

COMIFER – Groupe N
Paris – 14 décembre 2015



Intensité du travail du sol et l'implantation de couverts:

- Effets sur les flux d'azote et de carbone sol-plante
- Conséquences sur la gestion de la fertilisation azotée des grandes cultures

ARVALIS
Institut du végétal

JP COHAN et coll. – Pôle Agronomie
jp.cohan@arvalisinstitutduvegetal.fr

Partie « effet du travail du sol sur les flux N et C » essentiellement issue de B. MARY, J-P. COHAN, B. DIMASSI, S. RECOUS, F. LAURENT 2014 (*Effets du travail du sol sur les cycles biogéochimiques de l'azote et du carbone : compréhension des mécanismes et conséquences pour la gestion des pratiques agricoles. Ouvrage « Faut-il travailler le sol » Ed. QUAE-ARVALIS*).



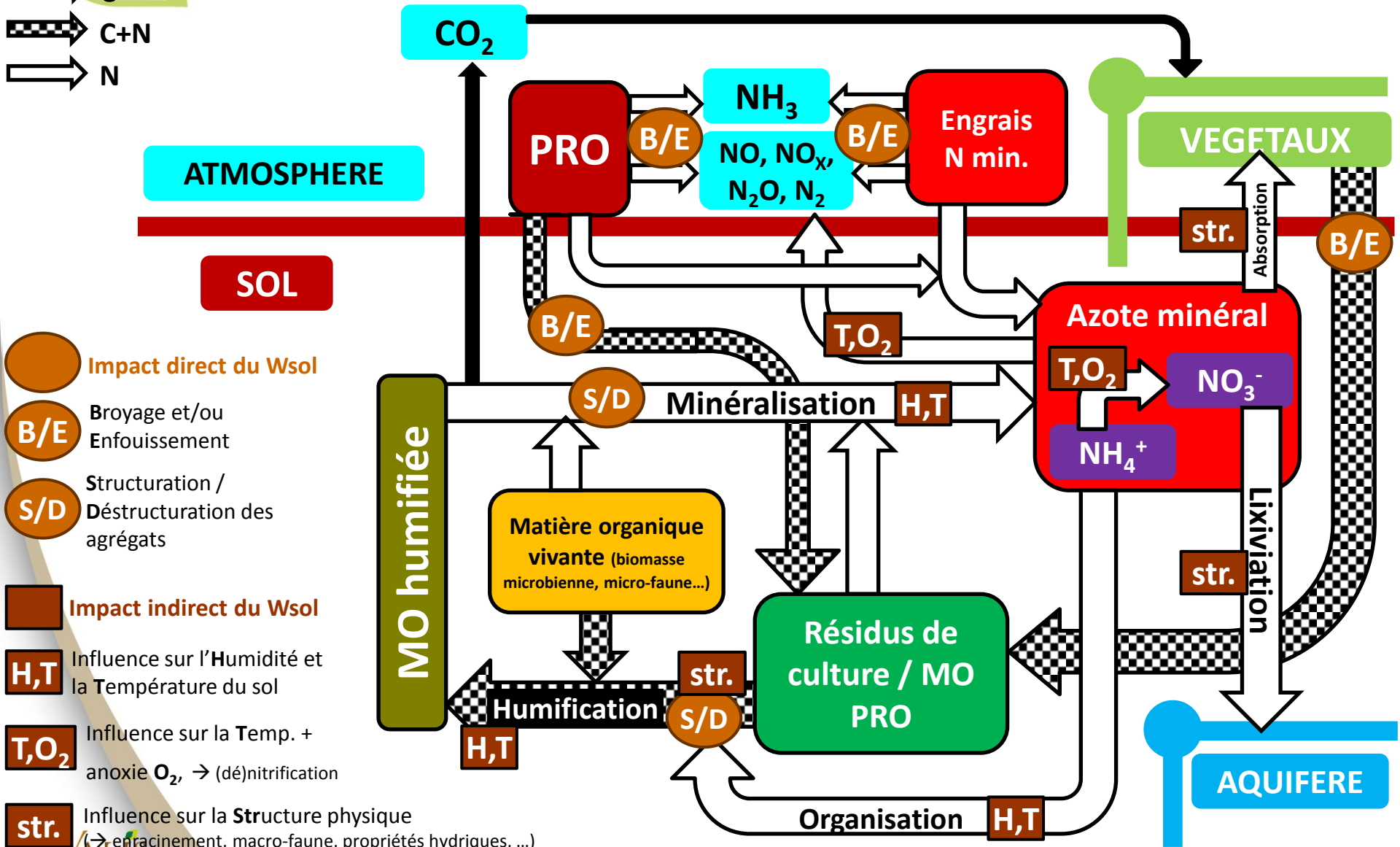
Intensité du travail du sol et flux N-C

Cycles simplifiés du C et du N

nœuds d'influence potentielle du W sol

Les Flux

- C
- C+N
- N



- Impact direct du Wsol
- Impact indirect du Wsol
- Broyage et/ou Enfouissement
- Structuration / Déstructuration des agrégats
- Influence sur l'Humidité et la Température du sol
- Influence sur la Temp. + anoxie O₂, → (dé)nitrification
- Influence sur la Structure physique (→ enracinement, macro-faune, propriétés hydriques, ...)



Intensité du travail du sol et flux N

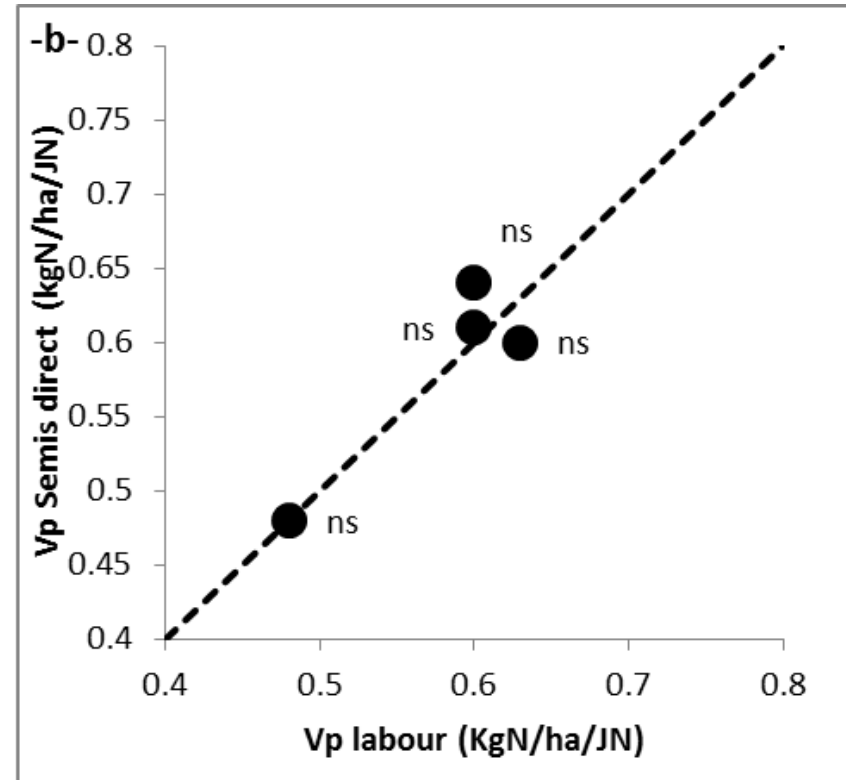
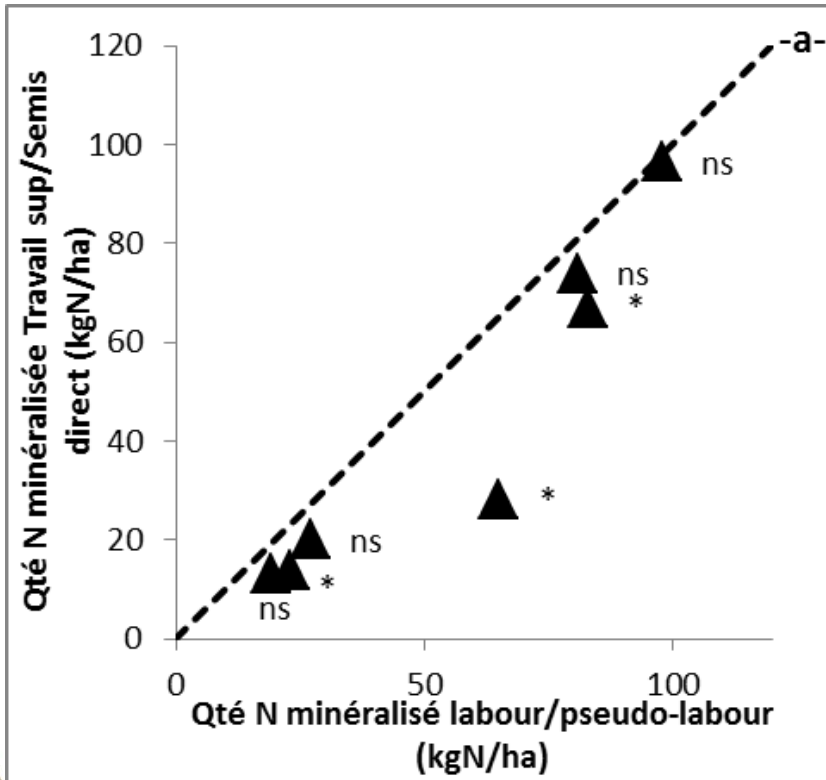
W sol et minéralisation nette de l'azote organique

Biblio (Le Souder et al .2007)

Grandes interrogations terrain

Dispositifs ARVALIS

Oorts et al. 2007 pour Boigneville



$$Mh = Vp * JN$$

Vp = vitesse potentielle de minéralisation (kg/ha/JN)

JN = nombre de jours normalisés sur la période de calcul de la méthode des bilans

Effet sur Vp :

- Court terme : pas de différence la plupart du temps, quelque fois en faveur de l'un ou l'autre
- Moyen/long terme : pas de différence

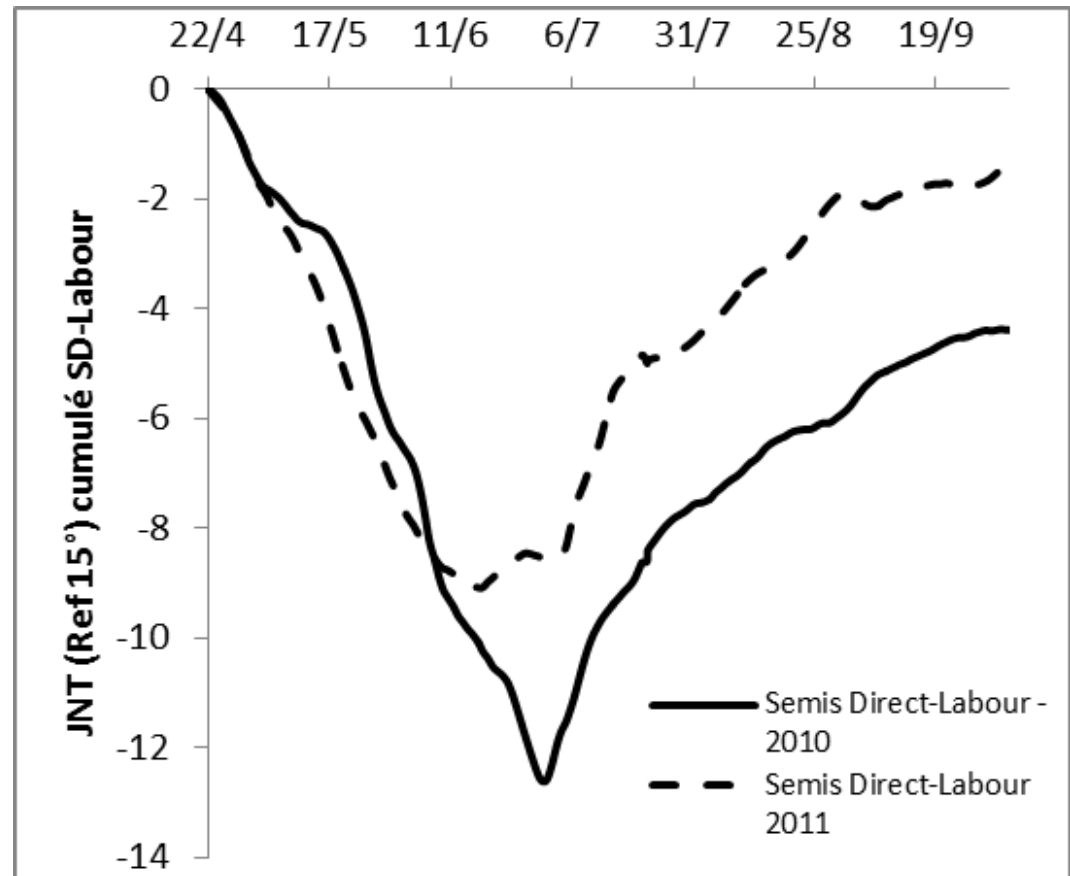
W sol et minéralisation nette de l'azote organique

W du sol et conditions de minéralisation :

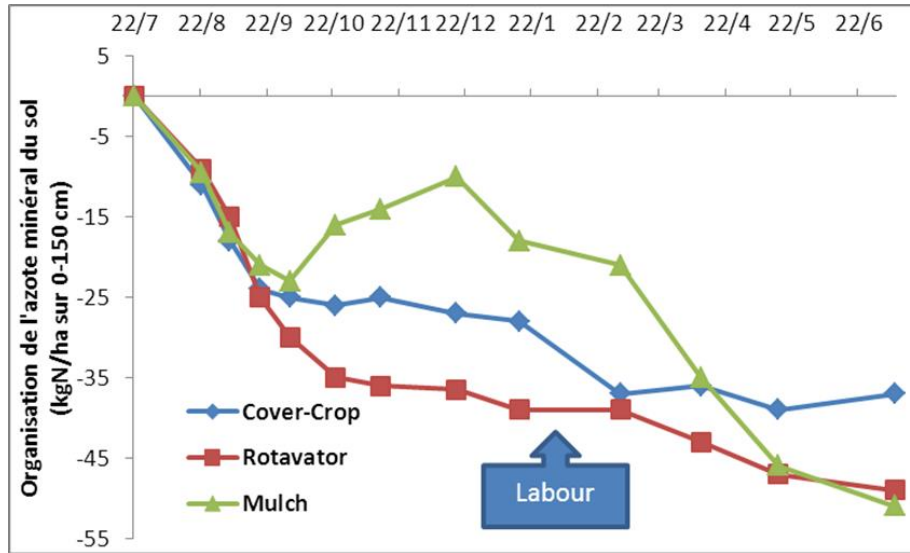
- Saisonnalité des effets
- Engendre peu d'écart de minéralisation cumulée susceptible d'affecter les quantités totales d'azote minéralisé

Essai Wsol Boigneville (91) –
Campagnes 2010 et 2011

Cause des retards de végétation
à chercher ailleurs ?



W sol et minéralisation des résidus de culture



Expérimentation de Mons (80) 1990-1991 (sol de limons) tirée de travaux INRA/HYDRO-AGRI (Darwis 1993).

Phénomènes sous-jacent potentiels

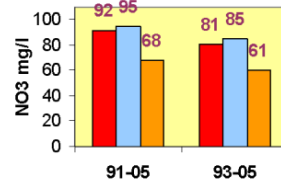
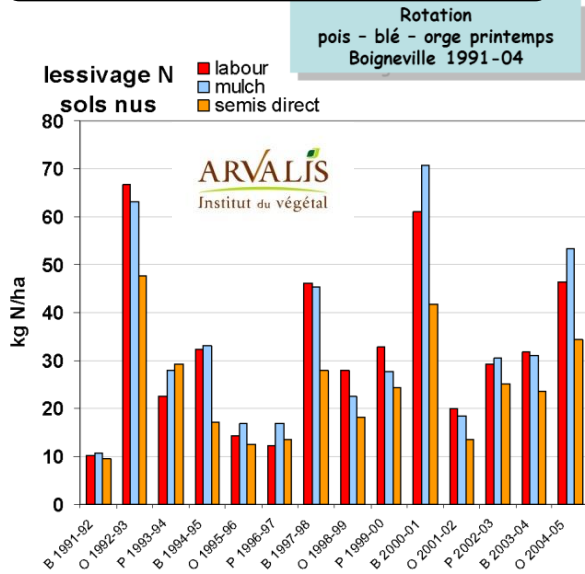
- Mise en contact des résidus avec les micro-organismes
- Effet sur l'humidité et la température de la couche de surface

Travaux en conditions contrôlées (Coppens et al., 2006, Findeling et al., 2007, Coppens et al., 2007)

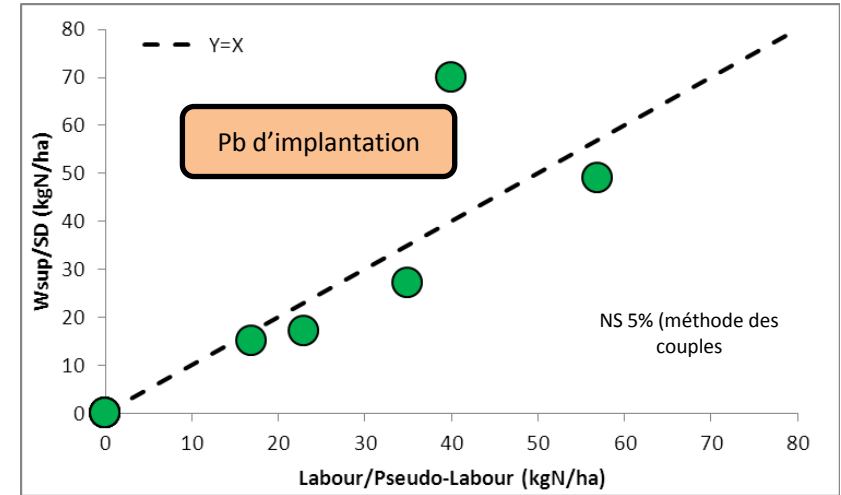
- Mise en contact des résidus avec les micro-organismes = facteur secondaire
- Effet sur l'humidité = facteur principale
- Interaction C/N des résidus et mise en présence avec N minéral sol

W sol et lixiviation du nitrate

Essai E de Boigneville (91)



Biblio (Le Souder et al .2007)



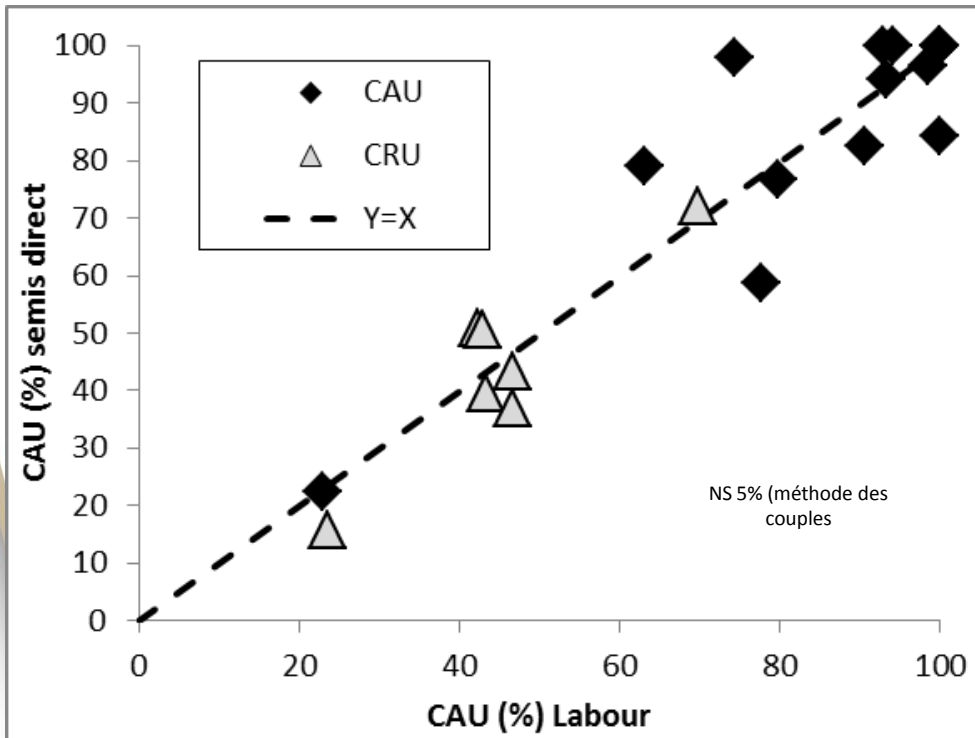
Des résultats diversifiés :

- Ecart de faible ampleur
- Si écart significatif, souvent en faveur du TCS
- Effet des CIPAN toujours bien supérieur au changement de Wsol



W sol et CAU/CRU

Biblio + essais ARVALIS-ITCF-CETIOM 1982-2004

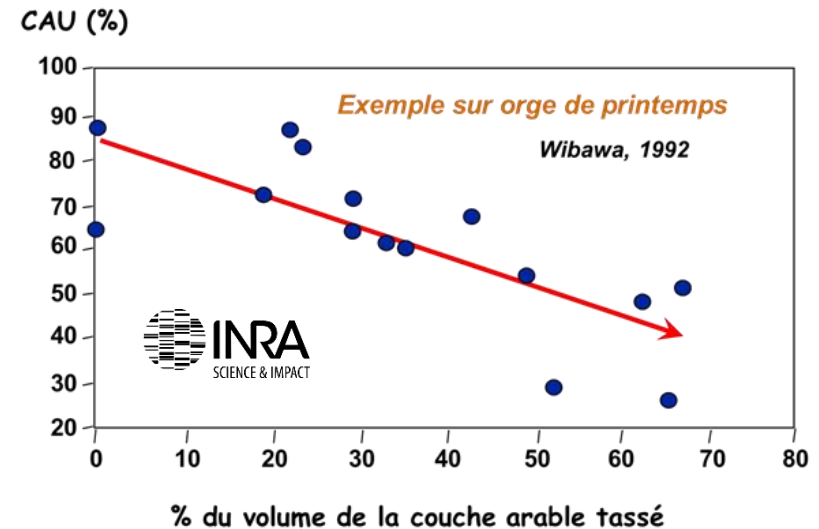


Effet sur les CAU en l'absence de pb d'implantation

- Peu ou pas de différence sur l'efficacité mesurée sur l'ensemble du cycle

Effet sur les CAU en cas de pb de structure

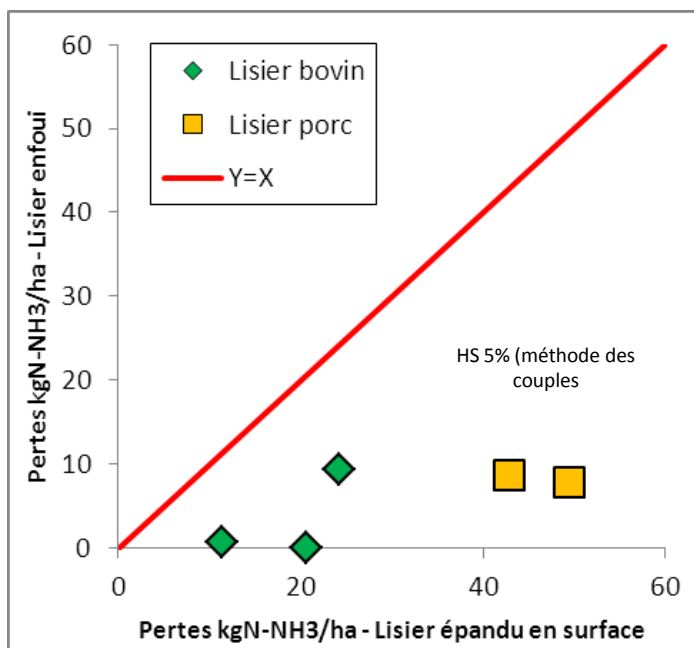
- Effet pénalisant potentiel sur les cultures les plus sensibles



W sol et volatilisation ammoniacale

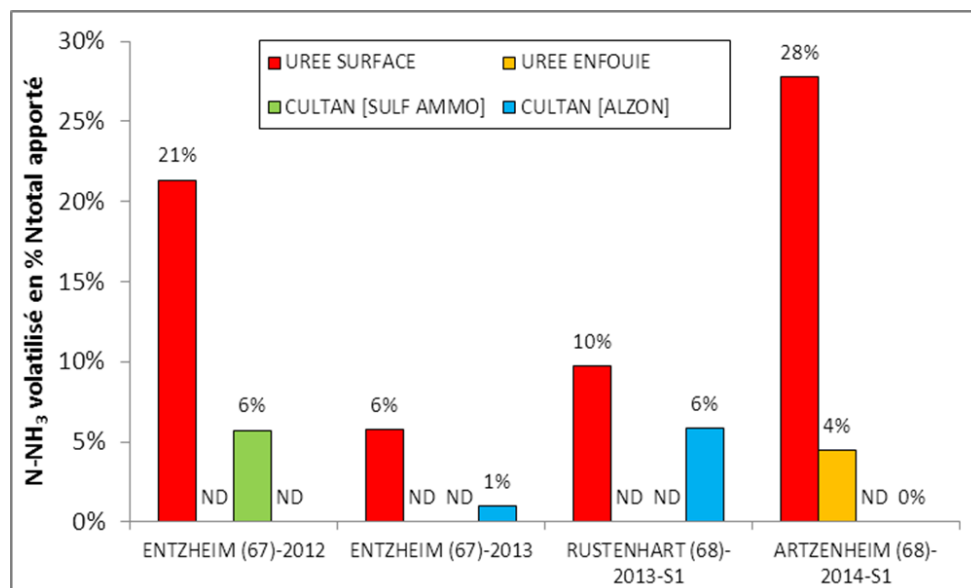
CASDAR Volat'NH3

Cohan et al. 2013



Projet INDEE

Cohan et al. 2015



Surtout une problématique pour les épandages précoces avec cultures peu développées
Impact plus restreint sur les apports d'engrais minéraux en pleine croissance des cultures (lien avec les CAU)

Pertes potentielles plus grandes en SD

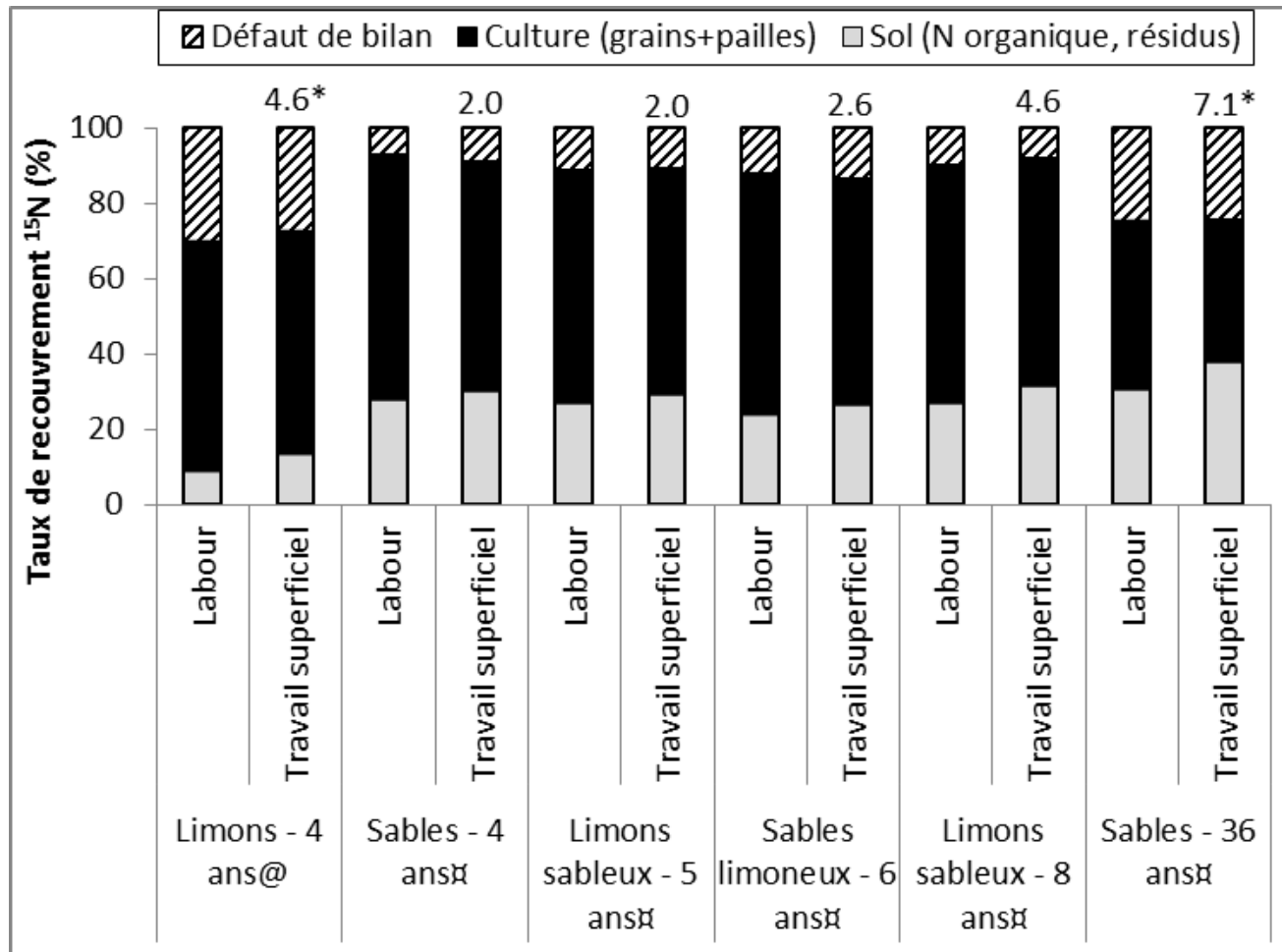
- Effet de l'enfouissement des résidus et des engrais/PRO
- Modifications des conditions de surface (hum., T°, pH...)
- Augmentation des flux en cas d'épandage sur résidus abondants.

W sol et organisation de l'azote de l'engrais

Les chiffres représentent la différence de taux de recouvrement dans le compartiment sol entre le travail superficiel et le labour : * = différence significative au seuil de 5%. Sur l'ensemble des essais, la différence moyenne de 3.8 % est significative au seuil de 5 % (test de Student de comparaison de moyennes appariées)

Organisation N dans la MO :

- Supérieure en TCS/Labour
- Augmentation de faible ampleur (< 4 %)





W sol et émission de N₂O

Meta-analyse de van Kessel et al (2012) : effet ancienneté

Tous

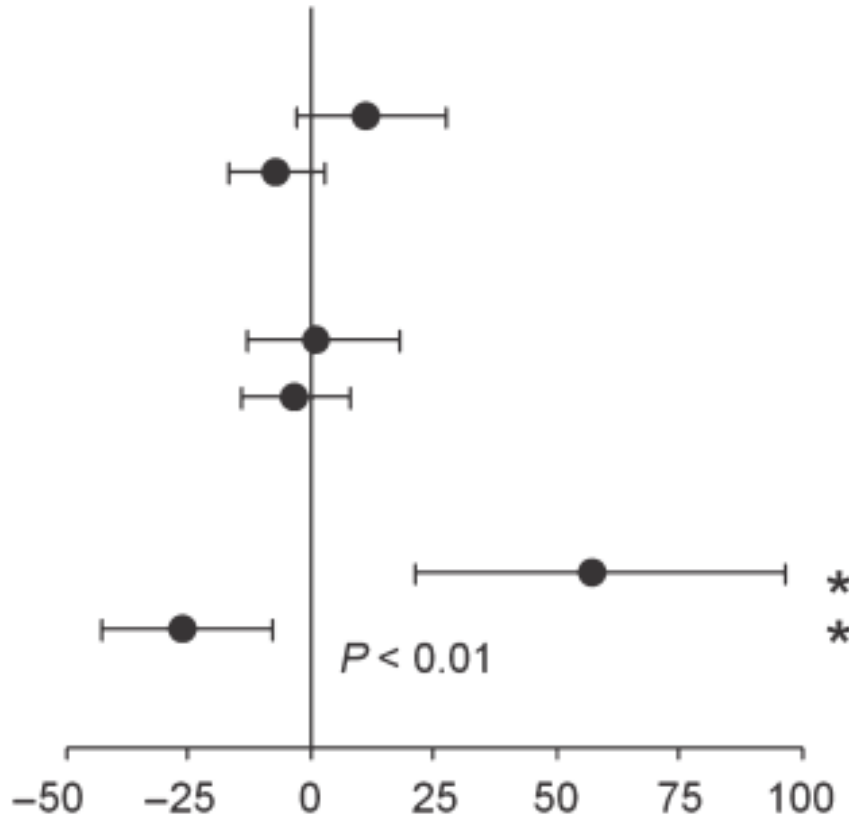
- < 10 ans
- > 10 ans

Climat humide

- < 10 ans
- > 10 ans

Climat sec

- < 10 ans
- > 10 ans



Variation relative par rapport au labour

En climat humide
peu de différence
entre TCS et labour

En climat sec
travail réduit

↗ N₂O à court terme

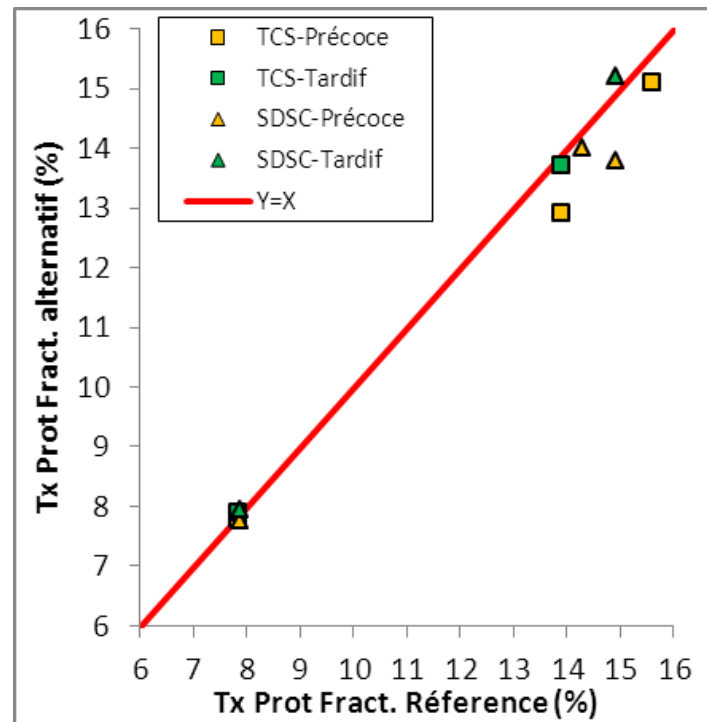
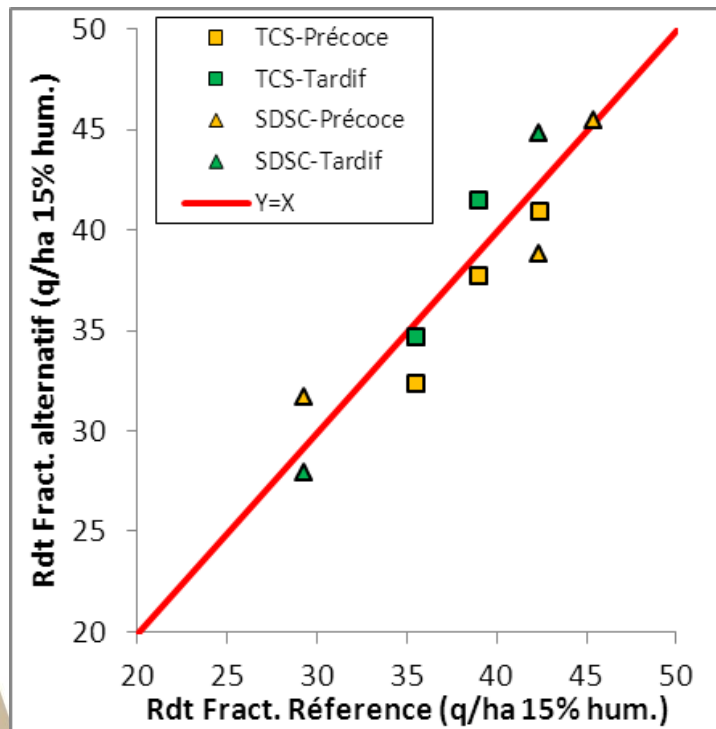
↘ N₂O à long terme

W sol et précocification des apports N

Rdt

Effet de la précocification des apports

Tx Prot



En TCS : Précoce – Référence = -2.0 q/ha*
 En SDSC : Précoce – Référence = -0.4 q/ha^{NS}

En TCS : Précoce – Référence = -0.5%^{NS}
 En SDSC : Précoce – Référence = -0.5%^{NS}

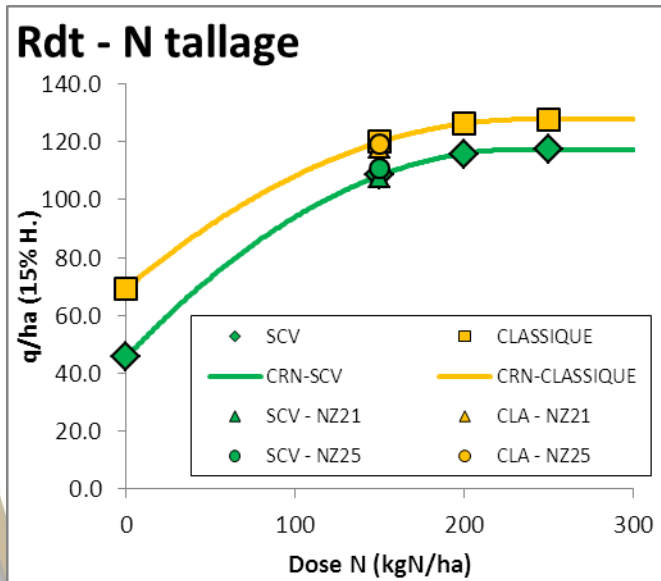
3 essais OP et OH 2011-2013 ARVALIS, CA21 et GEDA de la Tille

Test statistique par comparaison de moyenne (test de student)
 *** différence significative à 1%
 ** différence significative à 5%
 * Différence significative à 10%
 NS : Différence Non Significative

W sol et précocification des apports N

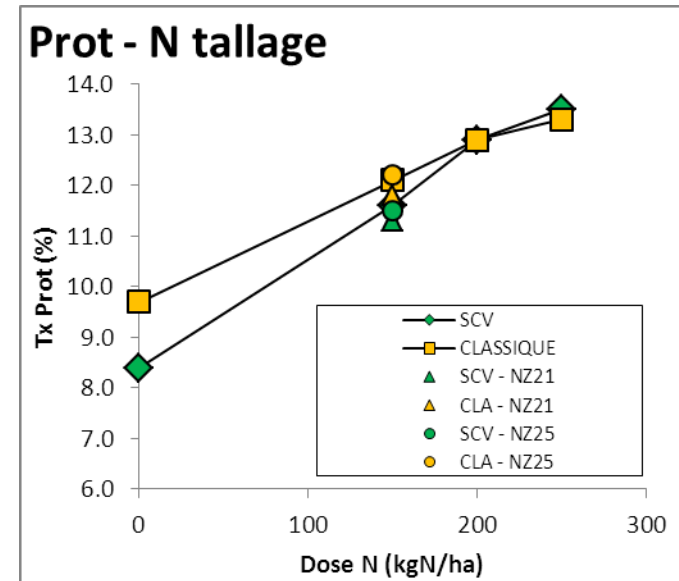
Test stade du 1^{er} apport

Rdt



Essai BTH 2014, ARVALIS, CA21, GEDA de La Tille (Gemeaux 21)

Prot



Comp/Z23

Z21

Z25

RDT CLA

NS

NS

RDT SCV

NS

NS

Conclusion :

- Pas d'effet du stade de l'apport tallage sur le rendement et la teneur en protéines.

Test statistique par contraste (analyse de variance)

NS : Différence Non Significative

CLA = TCS

Que penser de l'anticipation des apports N en systèmes TCS ?

- Remontées terrain fréquentes de cultures à démarrages difficiles en sortie d'hiver mais peu de diagnostics N correspondants
- Au regard des résultats acquis, peut-on vraiment attribuer cela à un défaut de fournitures N du sol ?
- Autres raisons possibles :
 - 1 - Pratique des couverts tardifs avec risque d'organisation N
 - 2 - Effet de la température et l'humidité sur la croissance précoce (notamment racinaire)



Intensité du travail du sol et carbone du sol



W sol et stockage C

Comparaison des 3 méta-analyses récentes

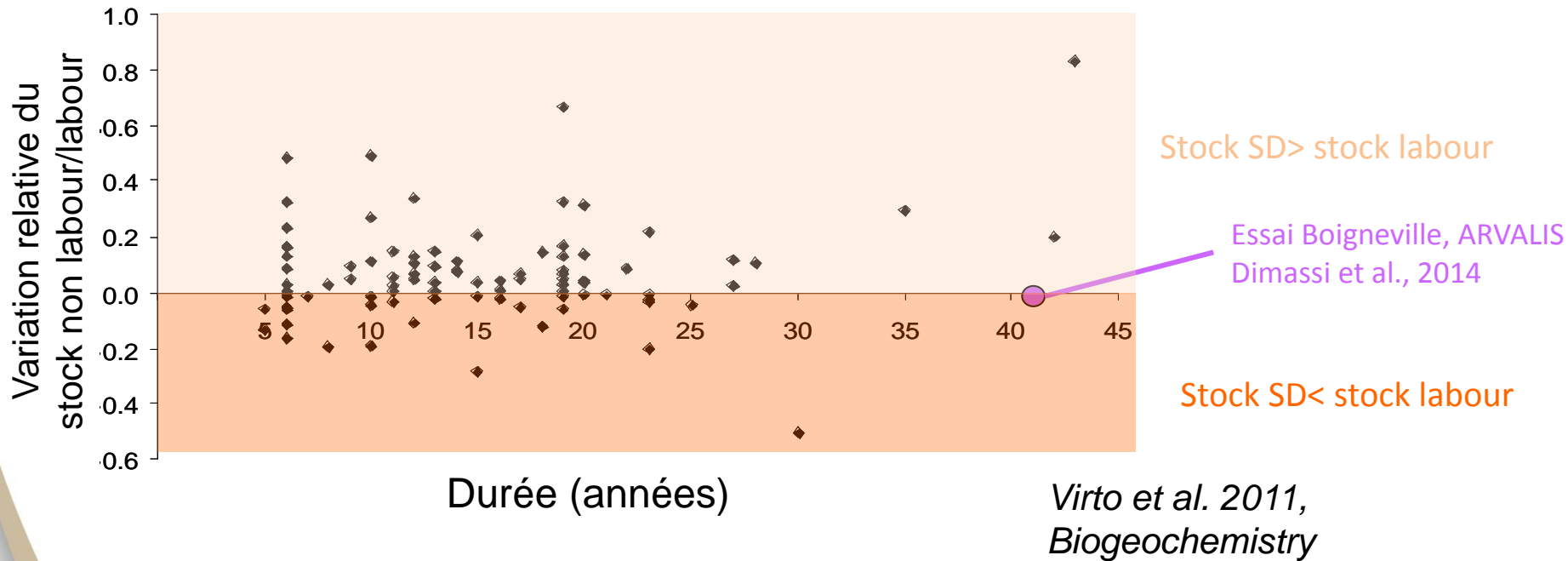
| | | Angers et al (2008) | Luo et al (2010) | Virto et al (2011) |
|------------------|--|------------------------|---------------------|-----------------------|
| Sélection | Nb de sites | 23 | 29 | 37 |
| | Nb de traitements | 47 | 69 | 91 |
| | Nb moyen années | 16 | 13 | 15 |
| Résultats | Supplément de stock en semis direct | | | |
| | Δ SOC (t/ha) | 4.9 | -0.2 | 2.1 |
| | Effet Sol | non | | non |
| | Effet Climat | non | non | non |
| | Effet Durée | oui | non | non |
| | Effet apports C | | oui | oui |
| | Effet Profondeur | FIT>NT | FIT>NT | |

Peu ou pas de stockage selon Luo et al (2010), Virto et al (2011)
Très grande variabilité des résultats : gamme de -68 à +70 t C/ha !



W sol et stockage C

- Effet du semis direct / labour: une analyse de résultats d'essais de longue durée publiés (sélection stricte des essais/méthodologie)

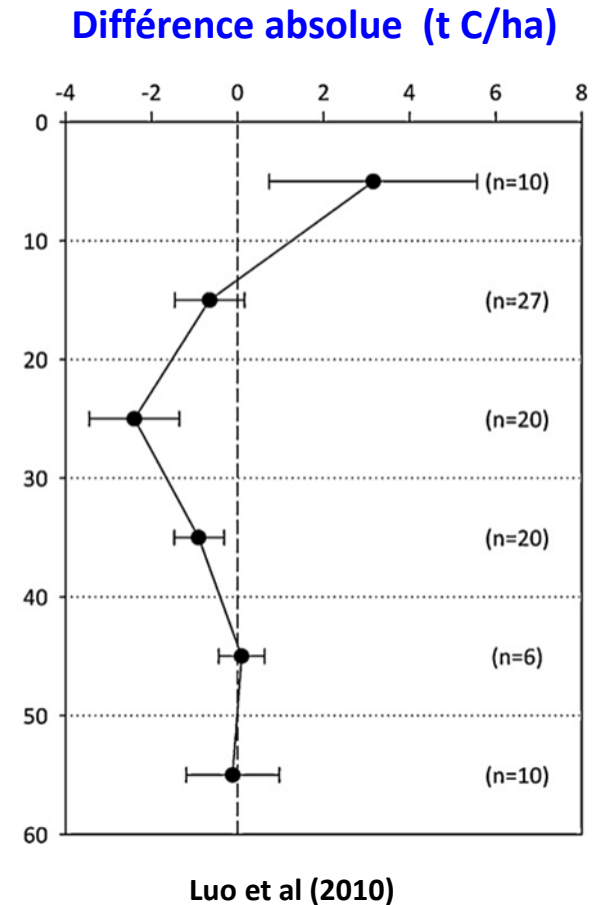
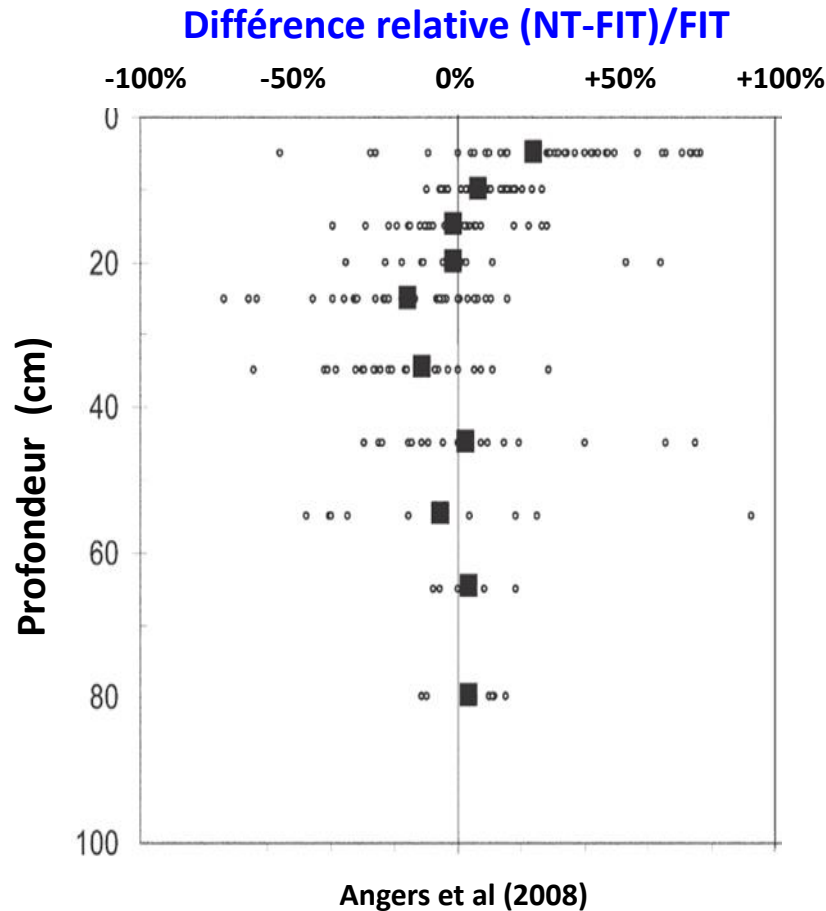


Méta-analyse expertise GES INRA (Pellerin et al. 2013) : 0,15 tC/ha/an (\pm 0,15 tC/ha/an)



W sol et stockage C

Distribution relative du carbone dans le profil de sol



**Stockage de C en surface (0-10 cm)
mais déstockage en profondeur (15-50 cm)**

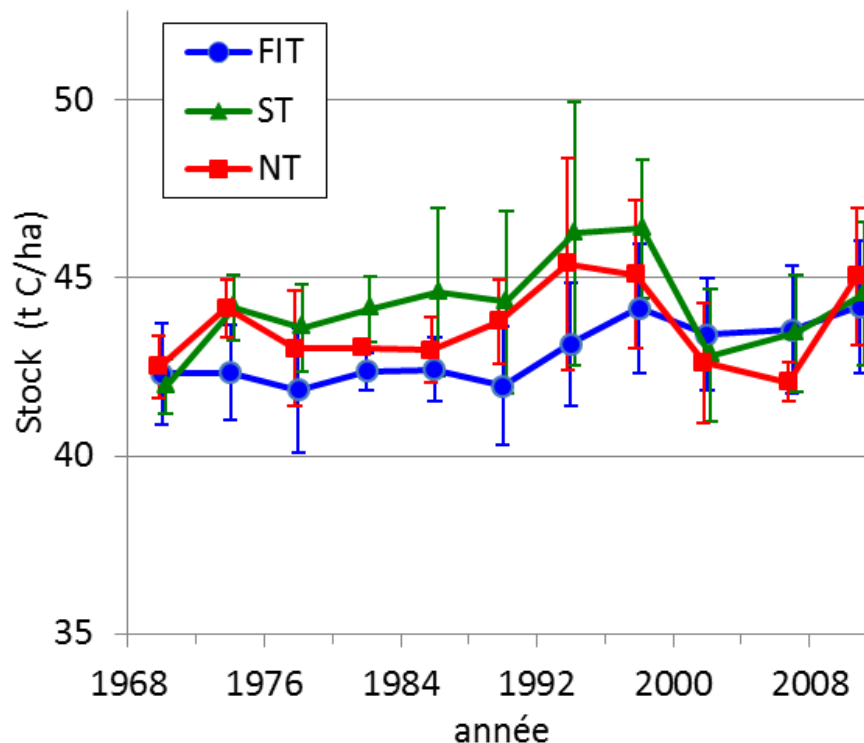


W sol et stockage C

Evolution des stocks de C (0-30 cm) pendant 41 ans – Essai A (Wsol Boigneville 91)

Dimassi et al (2014)

Suivis au champ



Une augmentation modérée des stocks au cours du temps

Des variations autour de cette tendance : réelles ou non ?

(Dimassi et al, 2014)

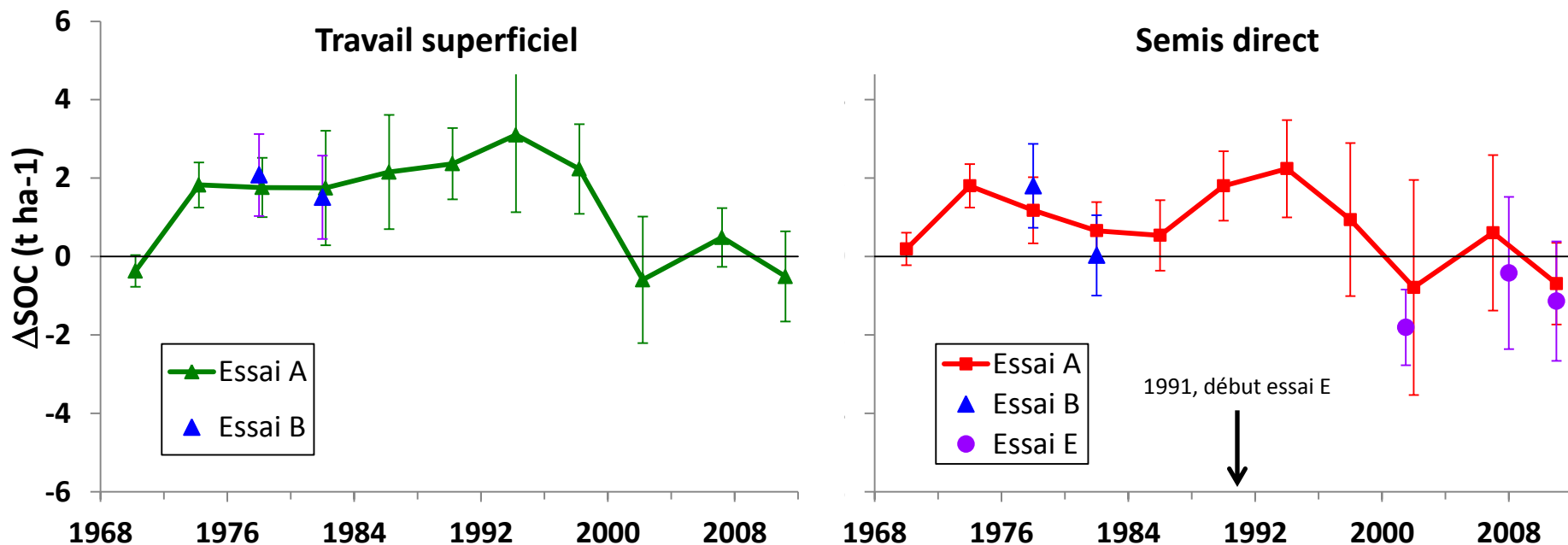


W sol et stockage C

Evolution du stockage de C dû à la réduction du travail du sol

(essais W sol Boigneville 91)

(écart par rapport à la conduite en labour)



Dimassi et al (2013, 2014)

Suivis au champ

Très bon accord entre les 3 essais

Au cours du temps, on peut avoir stockage de C puis déstockage

Le stockage n'est pas du tout constant au cours du temps

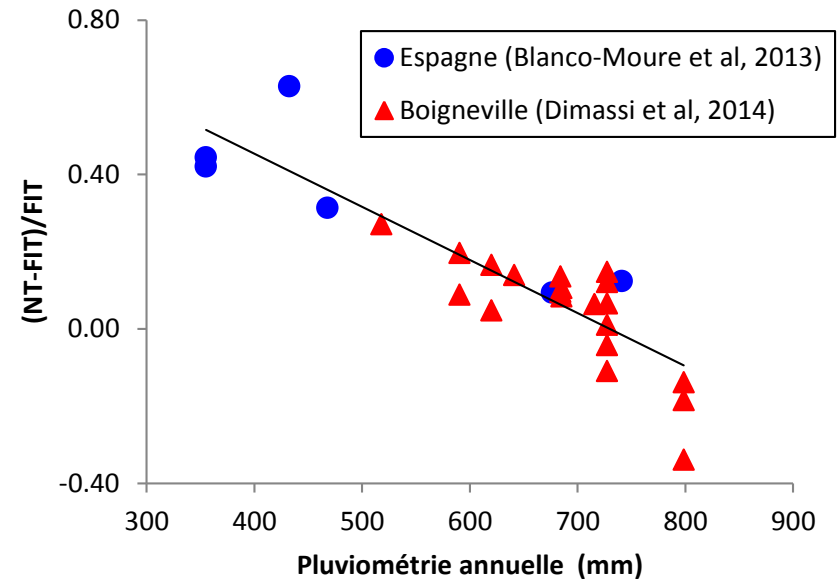
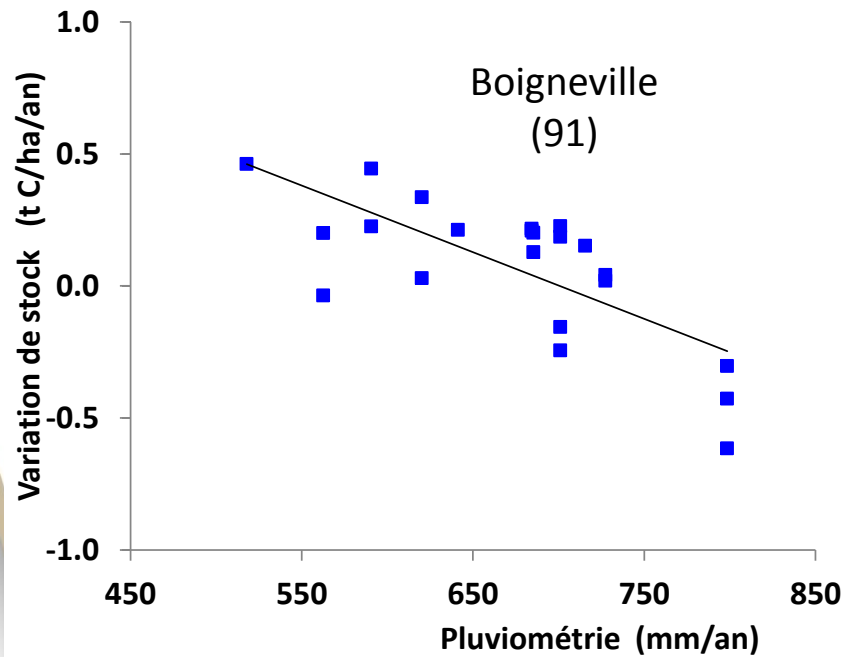


W sol et stockage C

Le stockage/déstockage dû au semis direct dépend du climat

Dimassi et al (2014)

Suivis au champ



En année sèche, le travail réduit stocke du C

En période humide, il déstocke du C

Abscisse : pluie + irrigation



W sol et stockage C

Impact des alternances de travail du sol Revue biblio Dimassi et al. 2013

| Référence | Site | Pays | Traitement avant | | Changement | Mesure SOC après changement | | |
|------------------------------|--------------|-----------|------------------|-----------------|---------------|-----------------------------|------------|-------------------|
| | | | Type | Durée années | | Durée années | Prof cm | Effet sur Stock C |
| Stockfisch et al (1999) | Goettingen | Allemagne | ST | 20 | 1 labour | 0.5 | 0-50 | chute immediate |
| Koch & Stockfisch (2006) | Goettingen | Allemagne | NIT | 6 | 1 labour | 2 | 0-45 | 2-6% diminution |
| Pierce et al (1994) | East Lansing | USA | NT | 6 | 1 labour | 1 | 0-20 | aucun changement |
| Kettler et al. (2000) | Sidney | USA | ST | 20 | 1 labour | 5 | 0-30 | aucun changement |
| Vandenbygaart and Kay (2004) | Ontario | Canada | NT | 22 | 1 labour | 1.5 | 0-30 | aucun changement |
| Quincke et al. (2007) | Lincoln | USA | NT | 11 | 1 labour | 1 | 0-30 | aucun changement |
| Wortmann et al. (2010) | " | " | " | " | " | 5 | " | aucun changement |
| Quincke et al. (2007) | Mead | USA | NT | 7 | 1 labour | 1 | 0-30 | aucun changement |
| Wortmann et al. (2010) | " | " | " | " | " | 5 | " | aucun changement |
| Yang et al. (2008) | Wosslee | Canada | NT | 13 | FIT permanent | 8 | 0-20 | aucun changement |
| Dimassi et al (soumis) | Boigneville | France | NT | 15 | NT permanent | 6 | 0-40 | aucun changement |
| | " | " | FIT | 15 | FIT permanent | 6 | 0-40 | aucun changement |

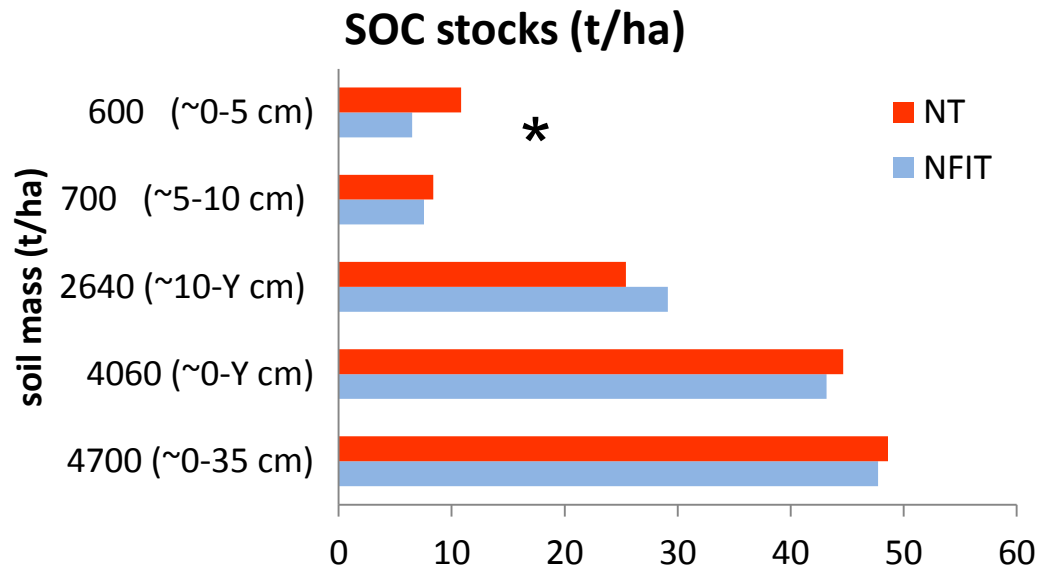


W sol et stockage C

Impact des alternances de travail du sol

Boigneville, essai E : 6 ans après conversion

Dimassi et al (2013)



Après 6 ans de conversion semis direct → labour,
le profil a changé mais le stock total de C est resté identique

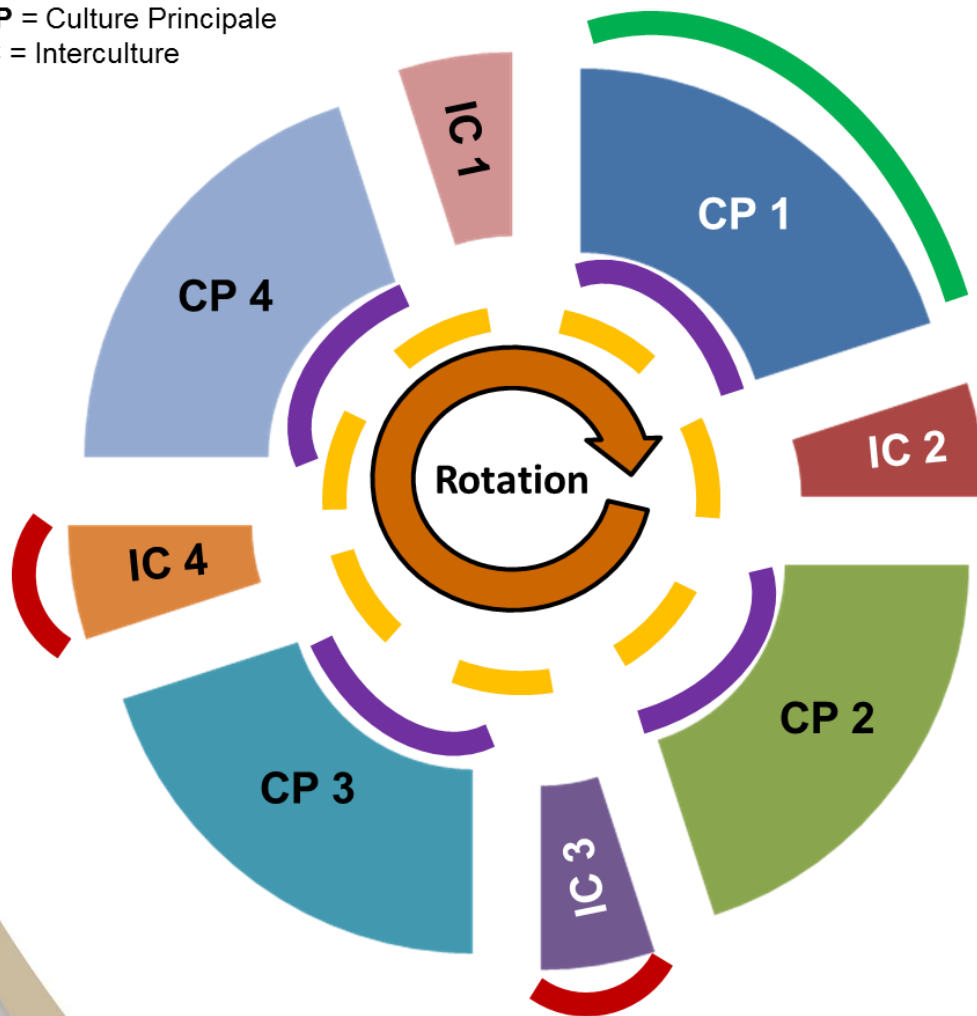
Contrairement aux idées reçues, le passage semis direct → labour
n'entraîne pas de chute du stock de C







Couverts et fertilisation N

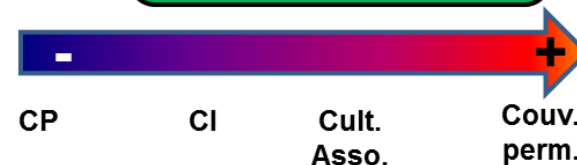
Insertion des légumineuses dans les SdC

CP = Culture Principale
IC = Interculture



-  Insertion en tant que CP
-  Insertion en tant que CI
-  Insertion en association avec la CP
-  Insertion en couvert semi-permanent ou permanent

Ampleur du changement de système de culture



La frontière entre les différents types d'insertion est parfois tenue (exemple : CI semée dans la culture précédente)

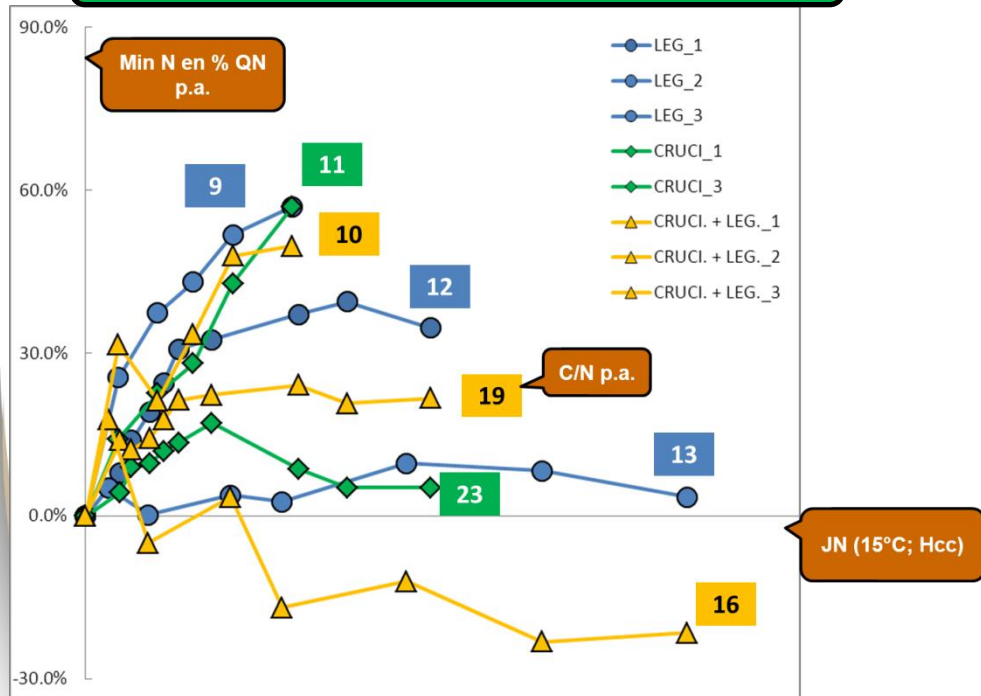


Légumineuses en cultures intermédiaires



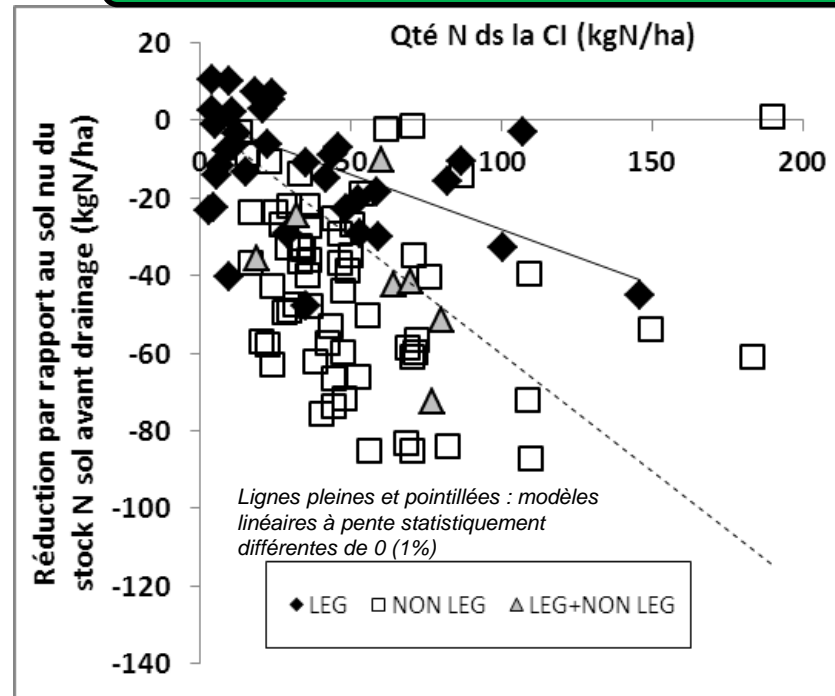
Légumineuses en cultures intermédiaires

Cinétiques de minéralisation



C/N plus bas des légumineuses et des mélanges à base de légumineuses = cinétiques de minéralisation plus aptes à fournir de l'azote à la culture suivante si on gère correctement la date de destruction

Effet CIPAN



Légumineuse : effet CIPAN significatif mais inférieur à celui des non légumineuses

Mélange : effet CIPAN sur la même tendance que les non-légumineuse

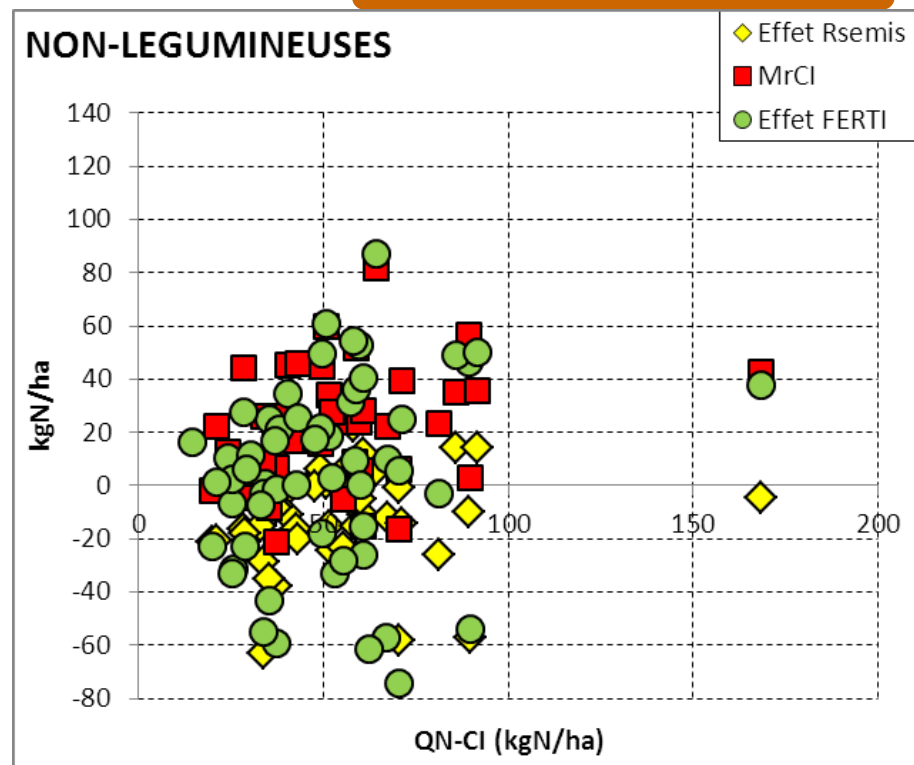
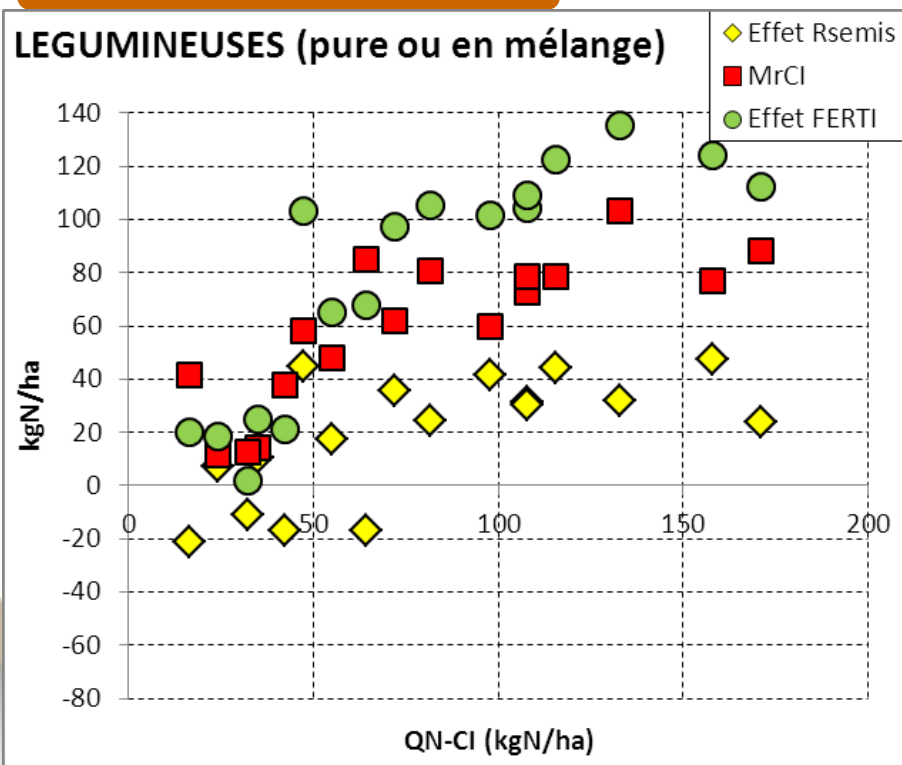
Légumineuses en cultures intermédiaires

Exemple sur maïs

LEGUMINEUSES*

Essais annuels 1991-2011 ARVALIS/ITCF/CREAS + résultats KERLAVIC (CRAB/ARVALIS) et BIGNAN (ARVALIS)

NON LEGUMINEUSES



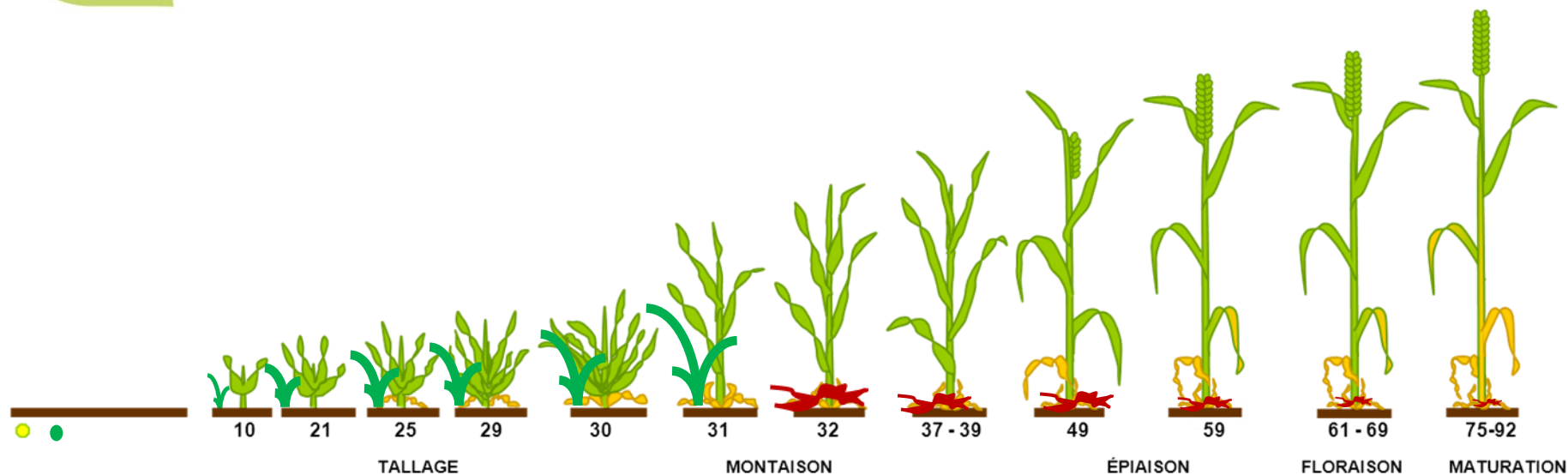
- Effet FERTI positif
- Lien avec QN-CI
- Effet Rsemis neutre à positif

- Effet FERTI variable et peu élevé en moyenne
- Peu de lien avec QN-CI
- Compensation du MrCI par l'effet Rsemis

*solo et en mélange

Légumineuses en cultures associées

Légumineuse non récoltée



**Semis
simultanés**



**Destruction en cours de
montaison (herbicide)**

Plusieurs essais de cette synthèse ont bénéficié de financements issus d'appels à projets :

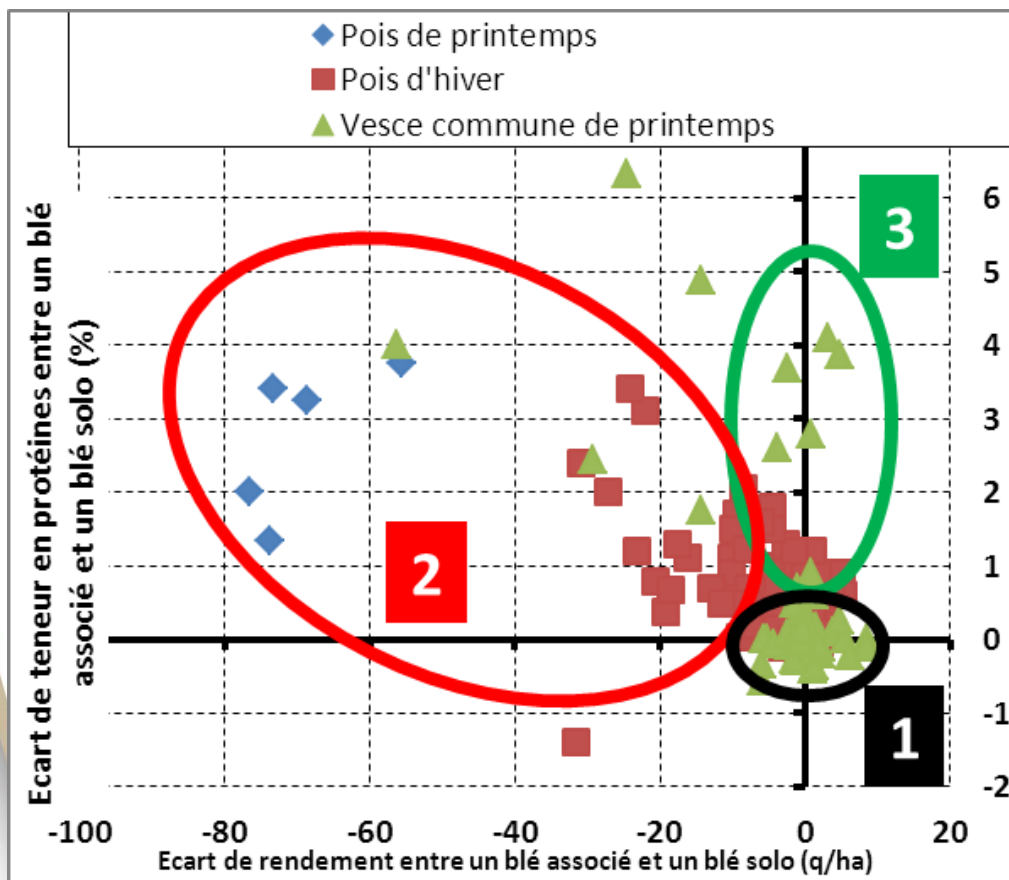
CASDAR 2009-2011 « concilier productivité et services écologiques par des associations céréale-légumineuse multi services en agricultures biologique et conventionnelle » (pilotage ESA Angers)

ANR SYTERRA PERFCOM 2009-2012 (pilotage INRA Montpellier)



Légumineuses en cultures associées

Légumineuse non récoltée



3 cas de figures

1 : aucun effet = croissance lég très faible

2 : forte pénalité rdt → effet tx protéines (concentration) = légumineuse trop compétitive (destruction trop tardive ou échec de la destruction)

3 : peu ou pas d'effet rdt mais un gain tx protéines = légumineuses suffisamment développée mais bien contrôlée par la suite

Comparaisons à dose N identique

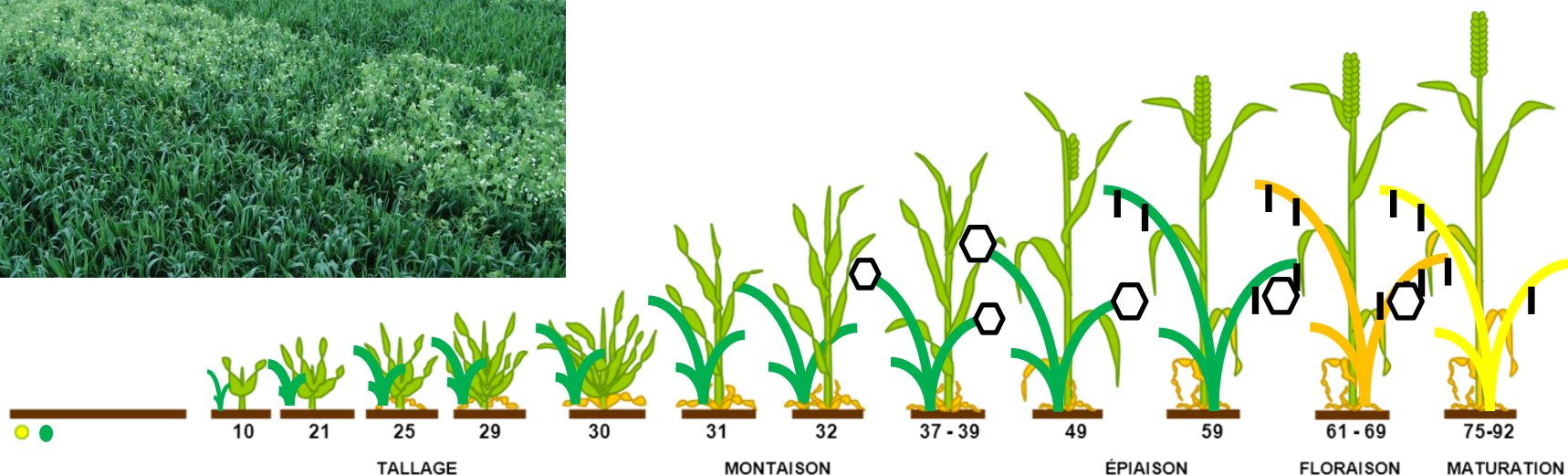
| Zone | Nb | DeltaR | | DeltaP | | Proportion |
|-------|-----|-------------------|------|--------------------|-----|------------|
| | | Moy | ET | Moy | ET | |
| Total | 160 | -5.8 | 14.2 | 0.6 | 1.0 | 100.0% |
| 1 | 78 | 0.2 ^{NS} | 2.6 | 0.04 ^{NS} | 0.2 | 48.8% |
| 2 | 44 | -20.3* | 20.6 | 1.21* | 1.2 | 27.5% |
| 3 | 38 | -1.1* | 2.8 | 1.25* | 0.9 | 23.8% |

2 points vesces extrêmes exclus

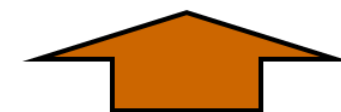
14 essais ARVALIS
2008-2010
Céréale : blé tendre
Légumineuses : pois protéagineux, vesce commune de printemps

Légumineuses en cultures associées

Avec récolte des deux cultures



**Semis
simultanés**



Double récolte

Plusieurs essais de cette synthèse ont bénéficié de financements issus d'appels à projets :

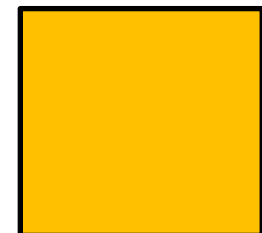
CASDAR 2009-2011 « concilier productivité et services écologiques par des associations céréale-légumineuse multi services en agricultures biologique et conventionnelle » (pilotage ESA Angers)

ANR SYTERRA PERFCOM 2009-2012 (pilotage INRA Montpellier)

COMIFER Groupe N – 14/12/15

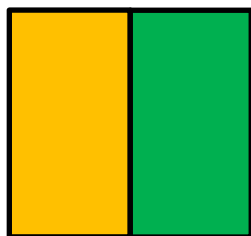
Légumineuses en cultures associées

Avec récolte des deux cultures

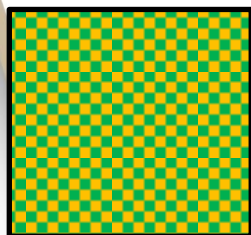


Point de départ : 1 ha de blé tendre cultivé à 100 % de sa densité de semis (supposée optimale) = **blé solo**

Objectif réintroduction du pois dans la rotation : sur le même hectare, cultiver à la fois du blé et du pois



→ Soit en séparant les cultures, ie 0.5 ha de blé et 0.5 ha de pois à 100% de leur densité de semis respectives (supposées optimales) = **(blé solo + pois solo)/2**

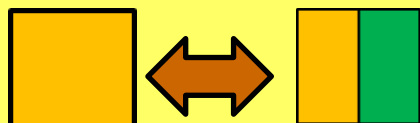


→ Soit en associant les 2 cultures, ie 1 ha d'associations avec le blé et le pois à des densités de semis infra-optimales par rapport aux semis mono-spécifiques (cas le plus courant : 50% des densités optimales du blé et du pois) = **blé asso + pois asso = tot asso**

Légumineuses en cultures associées

Avec récolte des deux cultures

Blé solo vs (blé solo + pois solo)/2



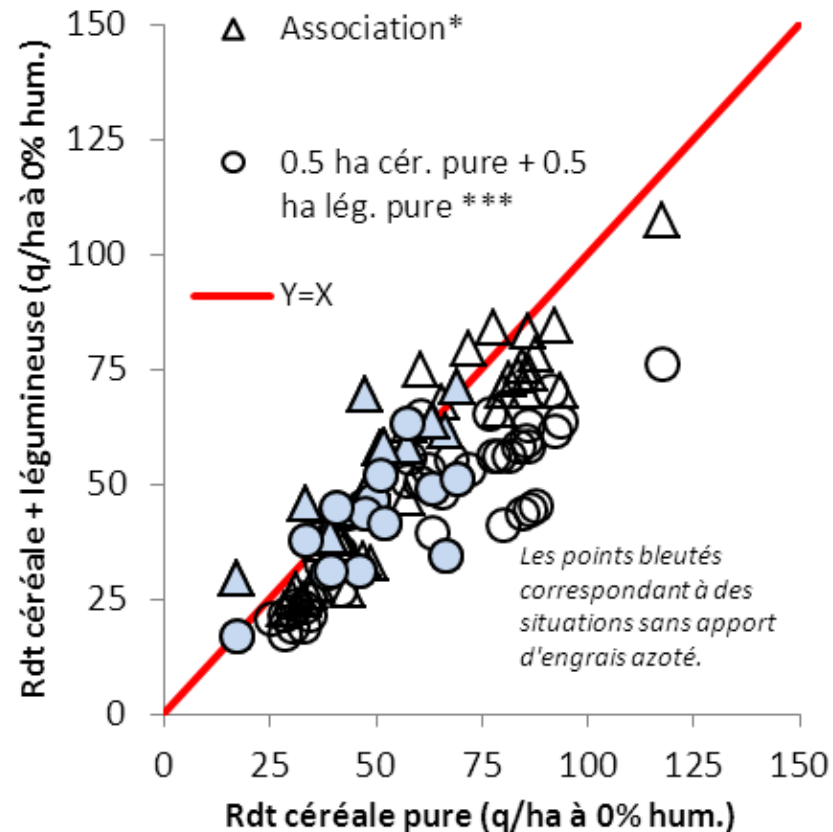
+ 14,1*** q/ha en faveur de la céréale pure
(de - 5,6 à + 42,6 q/ha)

Blé solo vs tot asso



+ 3,3* q/ha en faveur de la céréale pure
(de - 21,6 q/ha à + 23,3 q/ha)

16 essais – 2005 à 2011 (ARVALIS, ESA, INRA, CA79) – Céréales : blé tendre, blé dur; légumineuse : pois protéagineux, pois chiche



Test statistique de comparaison de moyenne (méthode des couples) :

* = différence significative au seuil de 5 %

*** = différence significative au seuil de 0,1 %

Légumineuses en cultures associées

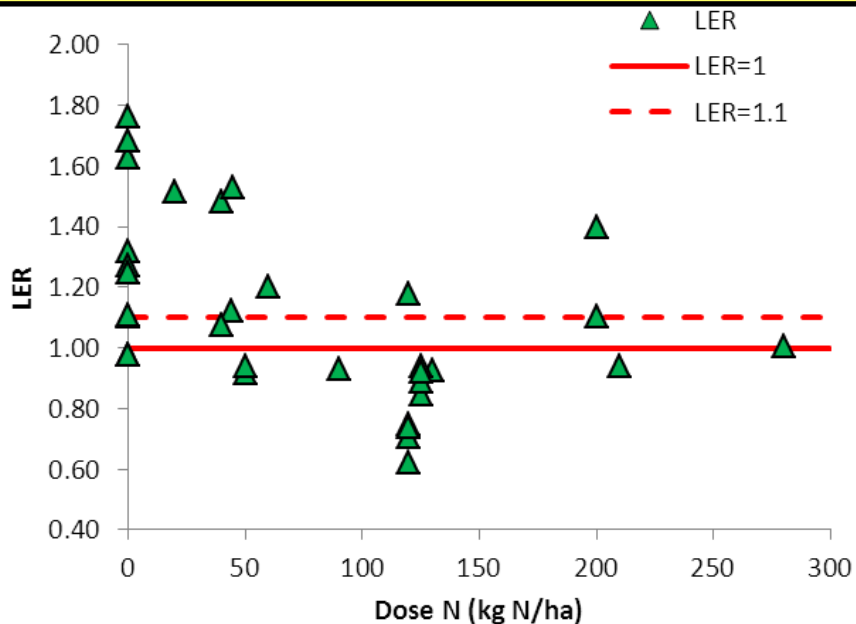
Avec récolte des deux cultures

(blé solo + pois solo)/2 vs tot asso

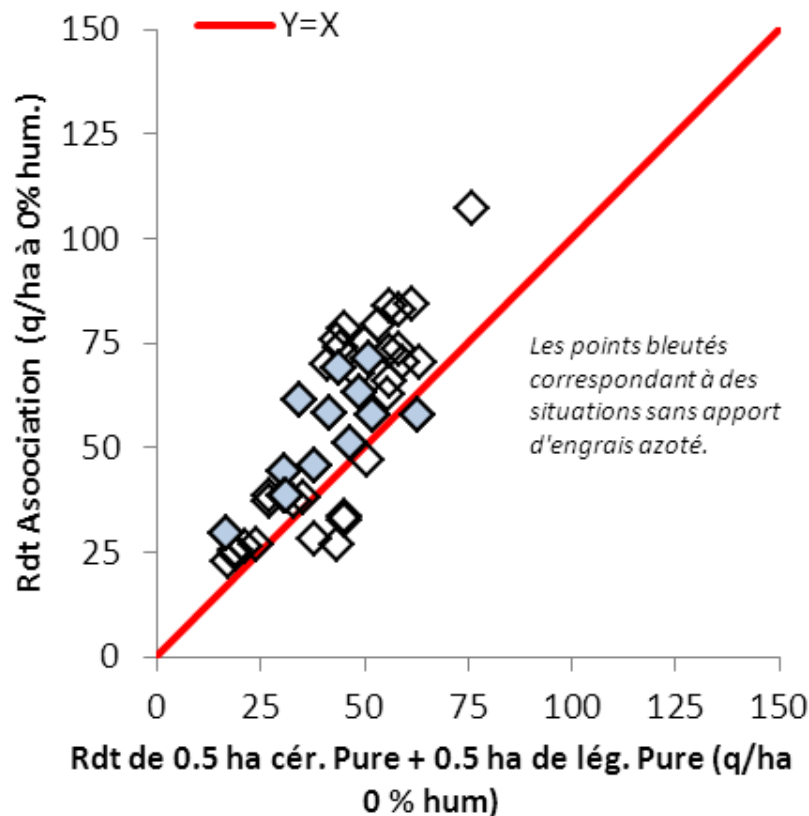


+ 11,9*** q/ha en faveur de l'association
(de - 16,5 à + 33,2 q/ha)

Association surtout performante en situation de faible fourniture N



16 essais – 2005 à 2011 (ARVALIS, ESA, INRA, CA79) – Céréales : blé tendre, blé dur; légumineuse : pois protéagineux, pois chiche



Test statistique de comparaison de moyenne (méthode des couples) :

* = différence significative au seuil de 5 %

*** = différence significative au seuil de 0,1 %

Légumineuses en cultures associées

Avec récolte des deux cultures

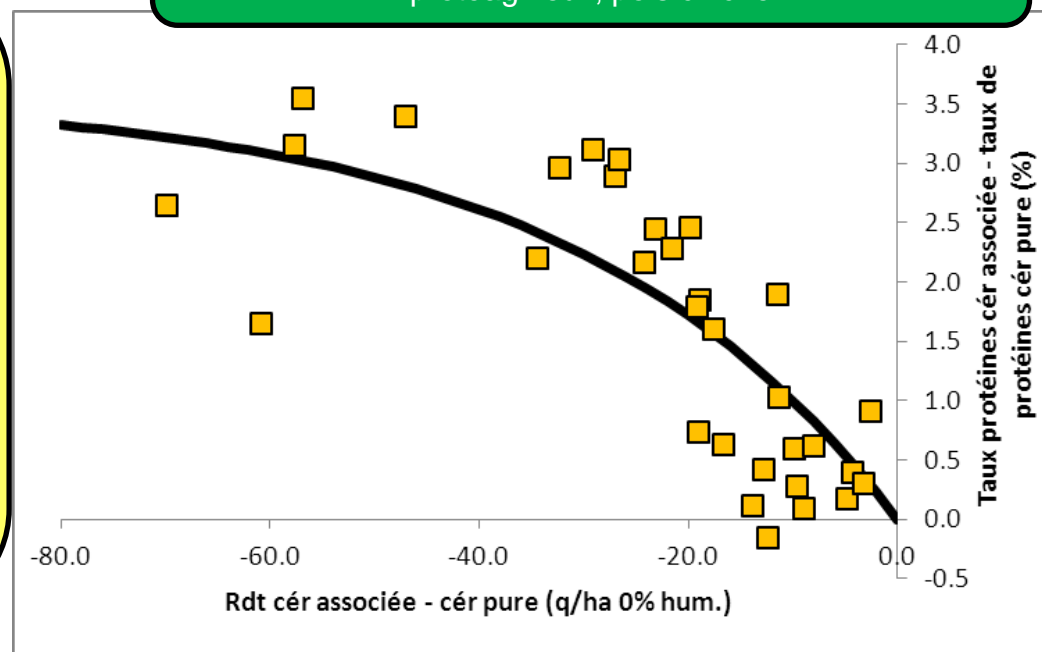
Blé solo vs tot asso



Blé associé : +1,6 % **tx prot** par rapport à la céréale pure.

Phénomène en grande partie lié à la concentration de l'azote dans le grain consécutive à la perte de rendement

11 essais – 2005 à 2010 (ARVALIS, ESA, INRA, CA79) –
Céréales : blé tendre, blé dur; légumineuse : pois protéagineux, pois chiche



Courbe = ajustement exponentiel statistiquement significatif à 1%



Légumineuses en couverts (semi) permanents

Technique encore en phase exploratoire

Principe : implantation des cultures en semis direct dans un couvert végétal de légumineuse laissé vivant mais dont la croissance est maîtrisée via des herbicides

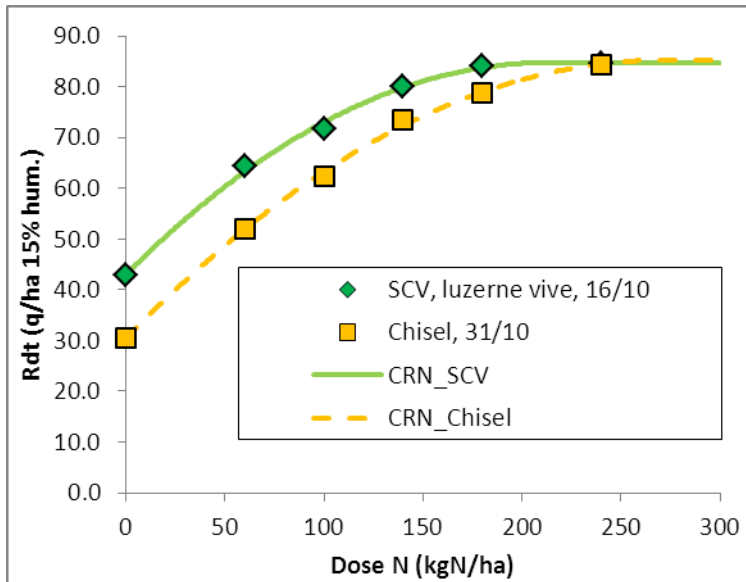
Attendus :

- Faciliter l'implantation des couverts (de + en + souvent semés avec le colza)
- Introduire une nouvelle source N via les légumineuses
- Bénéficier des effets indirects d'une couverture végétale permanente (lutte contre l'érosion, concurrence adventice, structuration du sol ...)

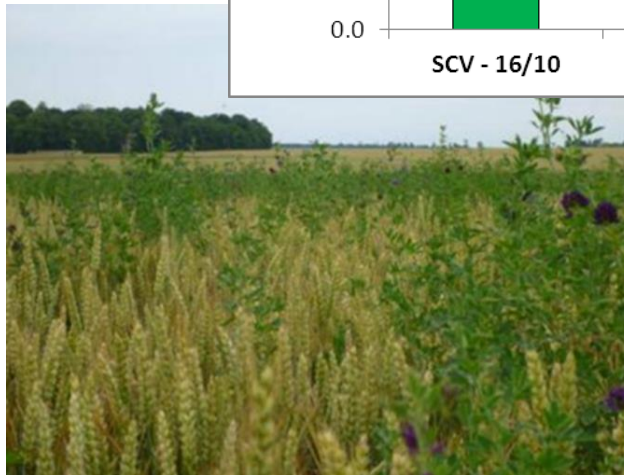
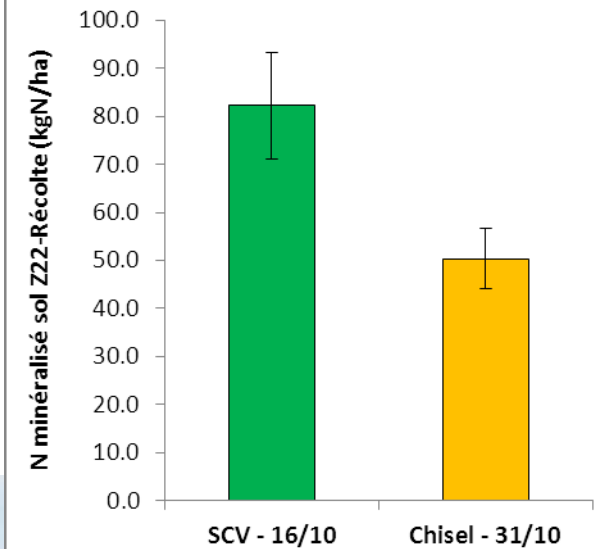
Légumineuses en couverts (semi) permanents

Contexte 2013 sans stress hydrique en cours de montaison

Essai ARVALIS chez M. Charpentier (Brives – 36/2013)
Couvert de Luzerne d'août 2011



Quantité d'azote minéralisé dans le sol cumulée Z22-Récolte



Partenariat réseau agriculteur
SCV – Lucien Séguy

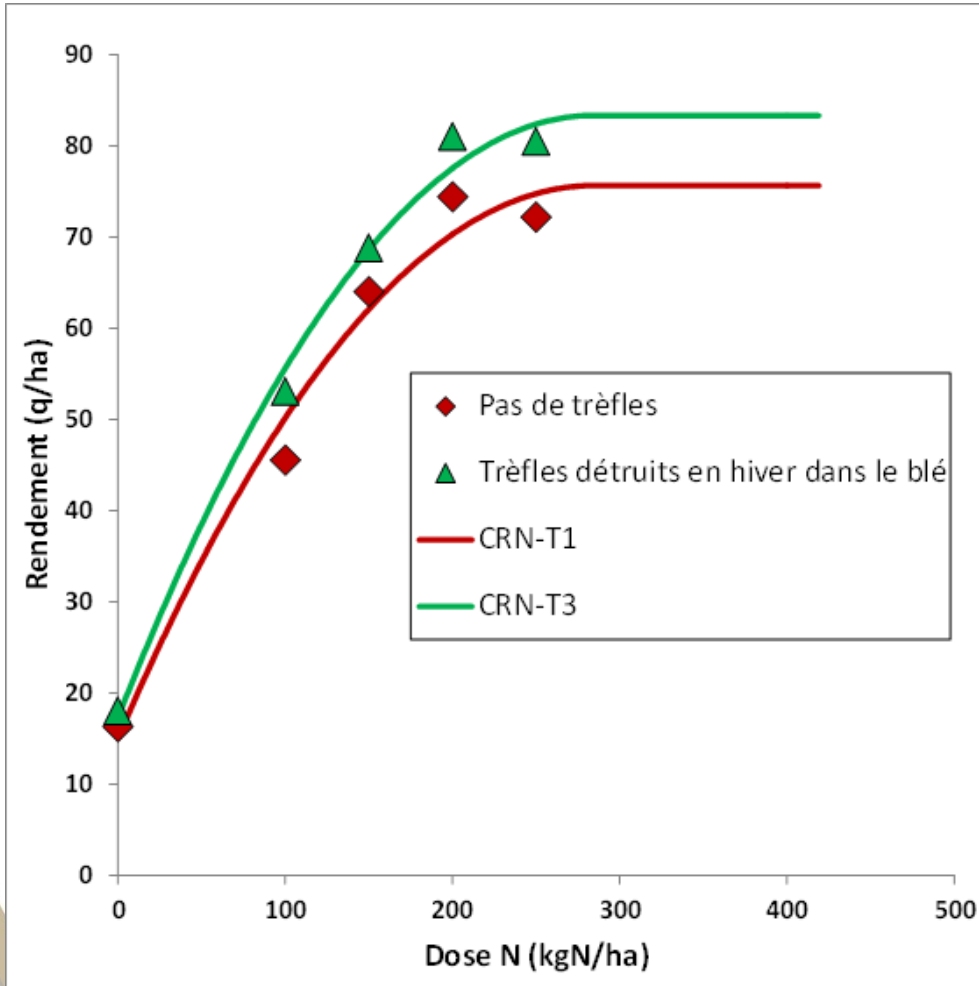
| | Chisel– 31/10 | SCV – 16/10 |
|---------------|------------------|--------------------|
| Nopt (kgN/ha) | 272 | 213*** |
| Ropt (q/ha) | 85.3 | 84.7 ^{NS} |
| ETR (q/ha) | 0.9 | 1.0 |

*** différence significative à 1% / NS : Différence Non Significative

COMIFER Groupe N – 14/12/15

Légumineuses en couverts (semi) permanents

Essai longue durée ARVALIS La Jaillière (44) – récolte blé 2014
Sol de limons argileux hydromorphes



T1 : pas de semis de trèfle dans le maïs précédent le blé

T3 : semis d'un couvert à base de trèfle dans le maïs, semis direct du blé suivant dans le couvert à l'automne, destruction du couvert en cours d'hiver dans le blé

Contexte 2014 automne humide avec couvert favorisant une meilleure structure de surface

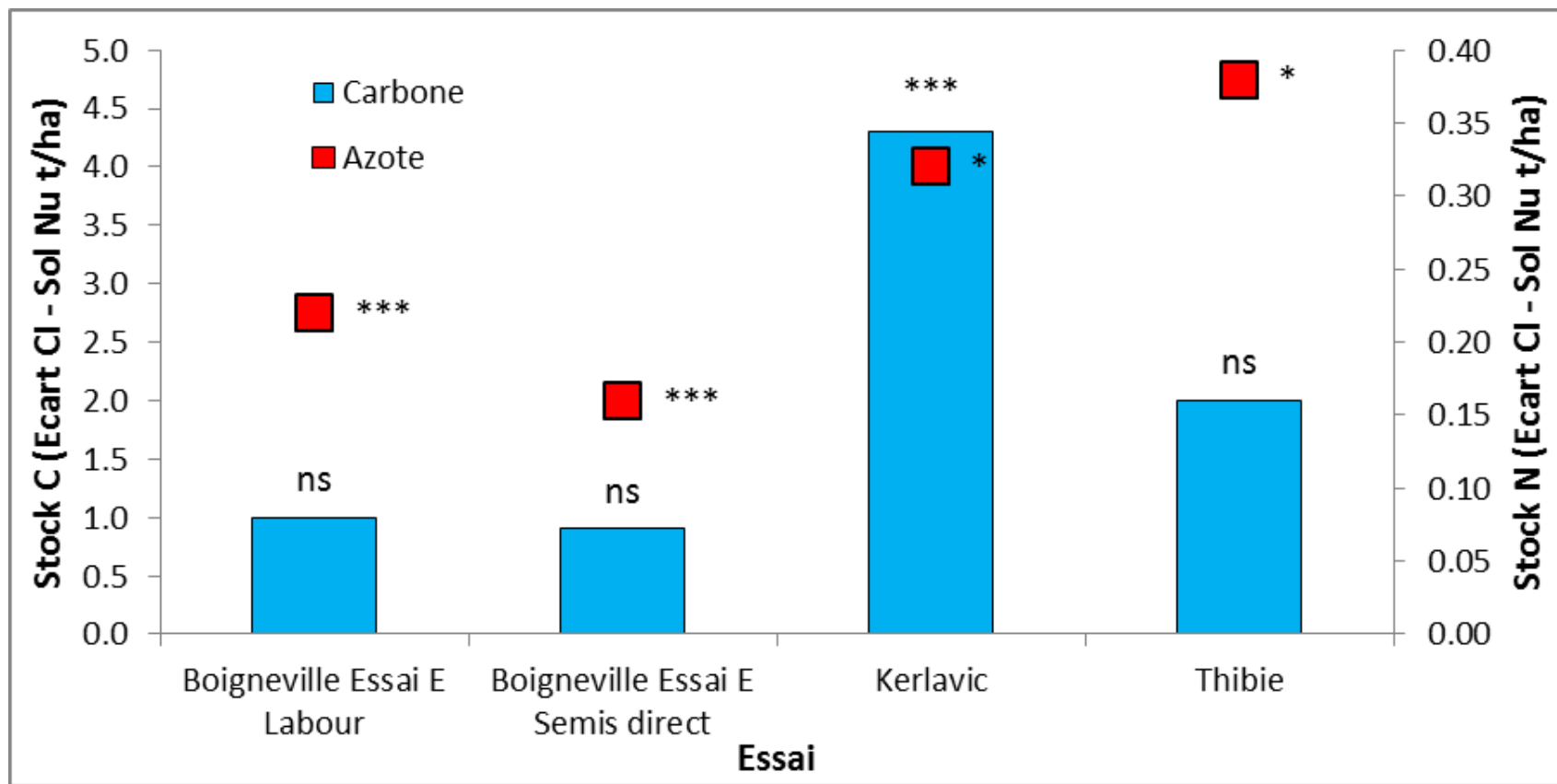
Ajustements des CRN selon un formalisme en quadratique-plateau (ETR d'ajustement = 5.0 q/ha pour le T1 et 3.4 q/ha pour le T3)



Interactions travail du sol et couverts



Stockage N et C



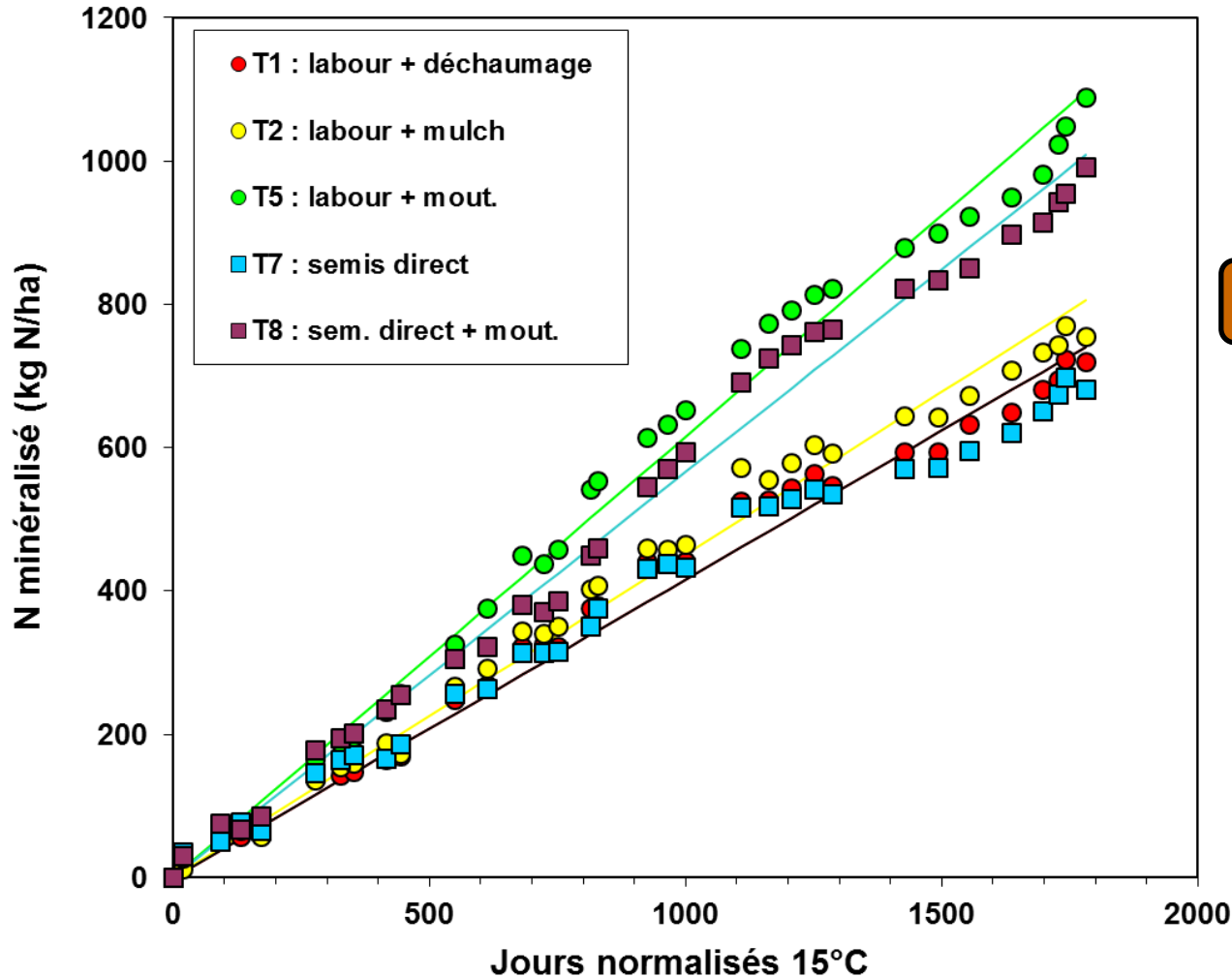
Constantin et al. 2010

*** différence significative à 1%

* différence significative à 10%

- Effets de l'insertion des CI sur les stocks N et C
- Pas d'interaction Wsol x CI sur les stocks N et C à Boigneville (essai E) → à mettre en lien avec la biblio

Minéralisation de l'azote organique



Essai E de Boigneville (91)

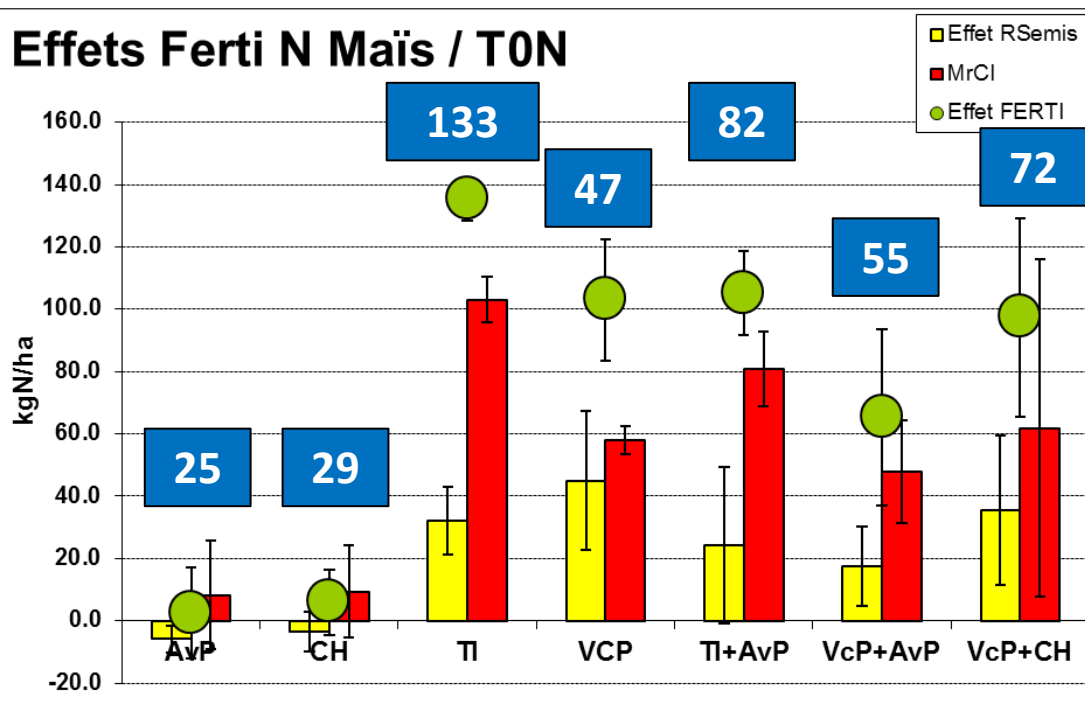
La dynamique de minéralisation est essentiellement influencée par l'insertion de couverts sans interaction apparente avec le type de travail du sol → à mettre en lien avec la biblio

W sol et temps de croissance des CI

Essai micro-parcelle Lyon St Ex 2011

Essai de GENAS (69) 2011 – sol de graviers
Couverts détruits le 01/03/11 puis labour
Maïs semé le 14/04/11

Effets Ferti N Maïs / TON



XX

= Qté N dans le couvert à destruction (kg N/ha)

Dans les milieux propices à un travail du sol tardif, le labour n'est pas antinomique avec des durées de croissance longue des CI et donc de fort effet N en cas de légumineuses.

Dans les milieux où le labour est nécessairement précoce pour se faire en bonnes conditions, le passage en TCS/SD est souvent la seule solution pour assurer des durées de croissance longue des CI.